



平成12年度

船舶からの温室効果ガス(CO<sub>2</sub>等)の  
排出削減に関する調査研究報告書

平成13年6月

財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団



## はじめに

本報告書は、競艇公益資金による日本財団の平成 12 年度助成事業として実施した「船舶からの温室効果ガス(CO<sub>2</sub>等)の排出削減に関する調査研究」の成果をとりまとめたものであります。

CO<sub>2</sub>などの温室効果ガスの削減に関しては、気候変動枠組条約締約国会議におきまして世界的な議論が展開されています。1997年12月に開催された第3回気候変動枠組条約締約国会議(地球温暖化防止京都会議)において、陸上発生源からの温室効果ガスの排出量に関し削減義務のある国では2008～2012年の年間排出量の平均が1990年排出量比で5.2%削減することとなり、それぞれの国に削減割当が課せられ、削減対策を進めることが合意されました。

他方、国際運輸にかかわる外航船舶につきましては、国際航海における規制の複雑さ、便宜置籍船制度など船舶運航の制度的特殊性などに鑑み、排出削減の方策について国際海事機関で検討することとされました。

当財団では、このような状況のなか、これまで実施してきた船舶排ガス関連の調査を踏まえて、CO<sub>2</sub>の排出量将来予測及びメタン、代替フロン等の温室効果ガスについても船舶からの排出量調査を実施するとともに、これらの調査結果をもとに船舶から排出される温室効果ガスについてどのような削減策を講ずればよいかについて、総合的な調査研究を行いました。

この調査研究は、芝浦工業大学 平田 賢 教授を委員長とする「船舶からの温室効果ガス(CO<sub>2</sub>等)の排出削減に関する調査研究委員会」各委員の熱心なご審議とご指導、国土交通省のご指導、並びに実船計測など関係各位のご協力により実施されたものであります。ここに衷心より厚くお礼申し上げます。

この調査研究の成果の一部は、国際海事機関の海洋環境保護委員会において船舶からの温室効果ガス削減策を検討する際の資料として役立てられておりますが、広く皆様にも活用され、温室効果ガスの削減すなわち地球温暖化防止に役立てていただき、地球環境保全と持続的社會発展を両立させるための一助としていただければ幸いです。

平成 13 年 6 月

財団法人シップ・アンド・オーシャン財団

船舶からの温室効果ガス(CO<sub>2</sub>等)の排出削減に関する調査研究委員会  
委員名簿 (順不同、敬称略)

委員長	平田 賢	芝浦工業大学 システム工学部 機械制御システム学科 教授
委員	加藤 洋治	東洋大学 工学部機械工学科 教授
"	篠田 匡史	財団法人 海事産業研究所 上席研究員
"	外岡 豊	埼玉大学経済学部 社会環境設計学科 教授
"	波江 貞弘	独立行政法人 海上技術安全研究所 機関動力部 部長
"	西川 栄一	神戸商船大学 機械システム講座 教授
"	羽田 知所	社団法人 日本船主協会 新造船幹事会 幹事長
"	増田 恵	社団法人 日本船主協会 常務理事・海務部長
オブザーバ	増井 隆夫	国土交通省 総合政策局 環境・海洋課 海洋室長
	大嶋 孝友	国土交通省 総合政策局 環境・海洋課 海洋室 専門官
	中川 直人	国土交通省 総合政策局 環境・海洋課 海洋室 第二業務係長
	国分 健太郎	国土交通省 海事局 技術課 技術第二係長
	小玉 真一	国土交通省 海事局 船用工業課 専門官
	村上 崇	国土交通省 海事局 船用工業課 計画係長
	大熊 明嗣	国土交通省 海事局 外航課
研究担当者	岡崎 修平	(財)シップ・アンド・オーシャン財団 海洋政策研究部 研究員
	森 雅人	(財)シップ・アンド・オーシャン財団 海洋政策研究部 研究員
	山城 隼人	(財)シップ・アンド・オーシャン財団 海洋政策研究部 研究員
研究協力者	野上 義夫	日本エヌ・ユー・エス(株) 環境事業統括本部 本部長代理
	岸本 幸雄	日本エヌ・ユー・エス(株) 環境事業統括本部 第二事業部 環境リスク評価グループ リーダー
	華山 伸一	日本エヌ・ユー・エス(株) 環境事業統括本部 第二事業部 技師

# 目 次

調査の概要	
1 調査の目的	1
2 調査の経過	1
3 調査の実施内容	2
3.1 外航船舶からCO <sub>2</sub> 排出量の推定	2
3.2 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの排出量に関する調査	2
3.2.1 原油タンカー荷室内のCH <sub>4</sub> 濃度の測定等	2
3.2.2 排ガス中のN <sub>2</sub> O濃度の計測	2
3.2.3 代替フロン類の使用実態調査	2
3.3 外航船舶の運航に伴う各温室効果ガス排出量推定	3
3.4 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 排出量の将来予測	3
3.5 外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの排出量削減対策に関する調査	3
3.5.1 CO <sub>2</sub> 削減対策の評価とその実用可能性の調査	3
3.5.2 CO <sub>2</sub> 以外の削減対策に関する調査	3
3.6 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 削減対策に係る海外情報についての調査	3
3.7 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> など温室効果ガス削減に向けての提言	3
4 調査結果の概要	4
4.1 外航船舶からCO <sub>2</sub> 排出量の推定	4
4.2 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの排出量に関する調査	4
4.2.1 原油タンカー荷室内のCH <sub>4</sub> 濃度の測定等	4
4.2.2 排ガス中のN <sub>2</sub> O濃度の計測	4
4.2.3 代替フロン類の使用実態調査	5
4.3 外航船舶の運航に伴う各温室効果ガス排出量推定	5
4.4 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 排出量の将来予測	5

4.5 外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの排出量削減対策に関する調査	6
4.6 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 削減対策に係る海外情報についての調査	6
4.7 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> など温室効果ガス削減に向けての提言	7

## 調査の内容

記号一覧	8
1 外航船舶からのCO <sub>2</sub> 排出量の推定	9
1.1 基本的な考え方 ~ 船舶カテゴリー別のCO <sub>2</sub> 排出量算定モデルへの展開 ~	9
1.1.1 燃料消費量を示す基本式	10
1.1.2 船舶の輸送量を示す基本式	10
1.1.3 船舶カテゴリー別の燃料消費量・CO <sub>2</sub> 排出量の基本式	12
1.2 基本的な数値の整理	14
1.2.1 外航船舶による世界の年間貨物量及び年間輸送総量	14
1.2.2 コンテナの年間貨物量と年間輸送総量の推定	15
1.2.3 外航船舶の船腹量	17
1.2.4 燃料消費率	18
1.3 各船種別の燃料消費量の推定	19
1.3.1 タンカー	20
(1) 原油及び石油製品の輸送に従事する隻数	20
(2) 原油の輸送による年間燃料消費量	21
(3) 石油製品の輸送による年間燃料消費量	24
(4) タンカー全体での年間燃料消費量	27
1.3.2 バルカー	28
(1) 鉄鉱石及び石炭、その他のバルクカーゴ輸送に従事する隻数	28
(2) 鉄鉱石の輸送による年間燃料消費量	30
(3) 石炭の輸送による年間燃料消費量	33
(4) その他のバルク輸送による年間燃料消費量	36

(5) バルカー全体での年間燃料消費量	39
1.3.3 コンテナ船	40
(1) 船型・船齢別の載荷可能量	40
(2) 平均運航速度	40
(3) 年間航海日数	41
(4) 船型・船齢別の積荷率と年間輸送総量	41
(5) 年間燃料消費量	42
1.4 船種別の燃料消費量とCO <sub>2</sub> 排出量	43
1.4.1 船種別燃料消費量のつみ上げとCO <sub>2</sub> 排出量への換算	43
1.4.2 バンカーオイル払い出し量からのCO <sub>2</sub> 排出量の推定	43
1.4.3 外航船舶によるCO <sub>2</sub> 排出量の寄与割合	44
2 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの排出量に関する調査	46
2.1 CH <sub>4</sub> の排出量の推定	46
2.1.1 船用機関からの排出量	47
2.1.2 原油の輸送プロセスに伴うCH <sub>4</sub> の排出量	48
(1) 積荷航海時のCH <sub>4</sub> 排出の状況	48
(2) バラスト航海時のCH <sub>4</sub> 排出状況	50
(3) 揚げ荷時のCH <sub>4</sub> 排出の状況	50
(4) 積み荷時のCH <sub>4</sub> ガス排出の状況	50
2.1.3 船舶からのCH <sub>4</sub> 排出量のまとめ	56
2.2 N <sub>2</sub> O排出量の推定	58
2.2.1 排出量の文献調査結果	58
2.2.2 排出量の実船調査結果	60
(1) 対象船舶	60
(2) 測定対象物質	60

(3) 測定方法	60
(4) 測定結果	62
2.2.3 船舶からのN <sub>2</sub> O排出量のまとめ	65
2.3 代替フロン類(HFCs)漏洩量の推定	66
3 外航船舶の運航に伴う各温室効果ガスの排出量推定	67
4 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 排出量の将来予測	69
4.1 輸送総量ならびに輸送容量の将来予測	69
4.1.1 タンカー及びバルカーの輸送総量ならびに輸送容量の予測	70
(1) 輸送総量の予測	70
(2) 輸送容量の予測	75
4.1.2 コンテナ船の輸送総量及び輸送容量の予測	78
(1) 輸送総量の予測	78
(2) 輸送容量の予測	80
4.2 燃料消費量及びCO <sub>2</sub> 排出量の将来予測	82
5 外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの排出量削減対策に関する調査	86
5.1 CO <sub>2</sub> 削減対策の評価とその実用性の調査	86
5.1.1 船舶における輸送エネルギー効率の向上の歴史	86
5.1.2 他の輸送機関の輸送エネルギー効率との比較	90
5.1.3 輸送エネルギー効率向上技術とその可能性	93
(1) 船型の最適化	93
(2) 船底防汚塗料などによる表面粗度の平滑化	94
(3) マイクロバブル技術による摩擦抵抗の低減	95
(4) 船体重量の軽減	95
(5) プロペラ効率化	96
(6) 舵の改良	98

(7) ディーゼル機関の燃費の改善	99
(8) 代替燃料	99
(9) その他の技術	100
5.2 CO <sub>2</sub> 以外の削減対策に関する調査	103
5.2.1 CH <sub>4</sub> 排出対策	103
5.2.2 N <sub>2</sub> O排出対策	105
5.2.3 HFCs排出対策	106
5.3 温室効果ガスの削減技術のまとめ	108
6 外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの削減に係る海外情報についての調査	109
6.1 気候変動枠組条約締約国会議における論議	109
6.2 国際運輸部門の論議	110
6.2.1 国際海事機関(IMO)における論議	110
(1) 第44回海洋環境保護委員会(MEPC44; 1999年4月開催)	110
(2) 第45回海洋環境保護委員会(MEPC45; 2000年10月開催)	111
(3) 第6回ばら積み液体と気体物質に関する小委員会(BLG6; 2001年2月開催)	112
(4) 第46回海洋環境保護委員会(MEPC46; 2001年4月開催)	112
6.2.2 国際民間航空機関(ICAO)における論議	113
7 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> など温室効果ガスの削減に向けての提言	114
7.1 外航船舶の運航に伴い排出されるCO <sub>2</sub> など温室効果ガス量の現状と将来予測	114
7.1.1 CO <sub>2</sub> 排出量	114
7.1.2 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 排出量の将来予測	115
7.1.3 外航船舶の運航に伴うCO <sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの排出	117
7.2 温室効果ガスの排出削減方策及び提言	118
7.2.1 評価基準の設定	118

7.2.2 外航船舶の運航に伴う温室効果ガス排出量削減方策の検討及び提言	118
(1) 短期的削減方策	120
(2) 中期的削減方策	126
(3) 長期的検討課題	129
7.3 結語	132

## 付録

1 船種ごとの燃料消費率の推定	134
1.1 タンカー	134
1.2 バルカー	136
1.2.1 鉄鉱石運搬船	137
1.2.2 石炭運搬船ならびにその他のバルカー	138
1.3 コンテナ船	140
1.4 設定した日当たり燃料消費量の妥当性検証	143
2 輸送容量の予測	145
2.1 タンカー・バルカーの輸送容量の予測	145
2.1.1 新規船腹需要量の予測結果	146
2.1.2 総解撤喪失量の予測結果	147
2.1.3 輸送容量の予測結果のまとめ	151
2.2 コンテナの輸送容量の予測	153
2.2.1 新規船腹需要量の予測結果	153
2.2.2 総解撤喪失量の予測結果	154
2.2.3 総輸送容量の予測結果のまとめ	156

3 対策を施した場合のCO2排出量の将来予測	158
3.1 対策1；老齢船の早期代替を促進し、輸送エネルギー効率の向上を図る場合	158
3.2 対策2；短期的に導入可能な燃料消費率の削減技術を見込んだ場合	161
3.3 対策3；減速航行を導入する場合	162
3.4 対策4；中期的に導入が想定される燃料消費率の削減技術を見込んだ場合	163
4 環境税の導入	165



## ・ 調査の概要



## 1 調査の目的

1997年12月の地球温暖化防止京都会議(COP3)において、温室効果ガス(CO<sub>2</sub>等)の削減についての基本合意がなされたものの、船舶から発生するCO<sub>2</sub>等の温室効果ガスについては、船舶の特殊性(国際航海における規制の複雑さ、便宜置籍船制度など船舶運航の制度的特殊性など)に鑑み、排出削減の方策について国際海事機関(IMO)で国際的に検討することとされた。

そこで、本研究では、これまで実施してきた船舶からのCO<sub>2</sub>の排出量の調査を踏まえてその後の社会情勢変化等を勘案した調査を行い、更に、CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスについても船舶からの排出量を調査するとともに、それらの調査結果をもとに、船舶から排出される温室効果ガスについてどのような削減策を講ずればよいかについて、技術的、社会経済的、政策的な観点を含め、総合的な調査検討を行うものである。

このような調査により得られた結果は、地球規模でのCO<sub>2</sub>等の排出量の削減に向けての国際的な枠組み、方法論、国及び民間機関の国際的協力体制、その他の有効な方策としてまとめ、我が国政府、IMO等の国際機関に対する提言として提示するとともに、国内外の関係各方面にも情報を発信する。

これにより、我が国における環境問題に対する社会的取組みに貢献するとともに、地球環境問題の解決に向け国際的検討に寄与することを目的とする。

## 2 調査の経過

調査の実施経過は以下のとおりである。

### 平成 12 年

- |             |   |
|-------------|---|
| 7月17日       | 第1回「船舶からの温室効果ガス(CO <sub>2</sub> 等)の排出削減に関する調査研究委員会」                           |
| 9月30日~10月8日 | 国際海事機関第45回海洋環境保護委員会に出席。プレゼンテーション実施及び温室効果ガスの排出対策等に関する動向を調査。                    |
| 12月1日       | 第2回「船舶からの温室効果ガス(CO <sub>2</sub> 等)の排出削減に関する調査研究委員会」                           |
| 12月1~10日    | 内航タンカーにおいて、排ガス中の亜酸化窒素(N <sub>2</sub> O)及び荷室内イナートガス中のメタン(CH <sub>4</sub> )等を計測 |
| 12月11~18日   | 内航貨物船において、排ガス中の亜酸化窒素(N <sub>2</sub> O)等を計測                                    |

### 平成 13 年

- |        |  |
|--------|--|
| 1月16日  | 船舶からの温室効果ガス(CO <sub>2</sub> 等)の排出削減に関する調査研究検討会開催                   |
| 2月5~9日 | 国際海事機関第6回ばら積液体と気体物質に関する小委員会に出席。プレゼンテーション実施及び温室効果ガスの排出対策等に関する動向を調査。 |
| 6月15日  | 第3回「船舶からの温室効果ガス(CO <sub>2</sub> 等)の排出削減に関する調査研究委員会」                |

### 3 調査の実施内容

外航船舶を対象として下記3.1及び3.2の調査により温室効果ガスの実態把握を行なうとともに、3.3、3.4の調査によりCO<sub>2</sub>排出量削減方策に関して比較検討を行い、その結果を踏まえ外航船舶の運航に伴う温室効果ガス削減に向けての総合的削減策の検討を行った。

#### 3.1 外航船舶からCO<sub>2</sub>排出量の推定

平成11年度までに実施してきた外航船舶からのCO<sub>2</sub>の排出量の調査を踏まえて、その後の社会情勢変化等を文献調査、アンケート調査等により補完し、CO<sub>2</sub>の排出量についてのフォローアップ調査を行った。

平成11年度事業において、運航量当たりのCO<sub>2</sub>発生量の算定に必要な運航パラメータを整理し、船種、重量トン、船齢クラス別運航モデルの作成を行い、この運航モデルに基づいて外航船舶からのCO<sub>2</sub>排出量の内訳を計算している。平成12年度事業においては、モデルの重要なパラメータである船型船齢ごとの年間運航日数・年間運航距離などについてデータを収集し、モデルを可能な限り実態に近づけるように改良した。

#### 3.2 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの排出量に関する調査

CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスのうち、メタン(CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)、代替フロン(HFCs)の排出実態についての調査を進め、全地球規模での温室効果ガス排出量の算定を行った。

##### 3.2.1 原油タンカー荷室内のCH<sub>4</sub>濃度の測定等

原油タンカーやプロダクトタンカーの荷室内のCH<sub>4</sub>濃度の測定や荷室へのイナートガス注入量や荷室内での原油ガス蒸散速度などについてデータ収集を行い、実際のオペレーティングの際の放出量を推定する。内航原油タンカーにおいて、原油荷室内のCH<sub>4</sub>濃度を測定した。また、原油備蓄基地など既存の調査事例と併せて、原油輸送オペレーティング中のCH<sub>4</sub>放出量を推定した。

##### 3.2.2 排ガス中のN<sub>2</sub>O濃度の計測

内航タンカー及び内航フェリーの排ガス中のN<sub>2</sub>O、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、THC、O<sub>2</sub>、及びCO<sub>2</sub>の濃度測定を行った。

##### 3.2.3 代替フロン類の使用実態調査

代替フロンの微量な排出濃度を直接測定する分析技術が確定していないことから、コンテナメーカーなどへの聞き取り調査を行い、冷媒の補給割合や年間補給量と補給回数など状況を収集整理した。

### 3.3 外航船舶の運航に伴う各温室効果ガス排出量推定

以上の調査結果に基づき、各温室効果ガスの排出量を試算するとともに、地球温暖化係数も考慮した総合的な地球温暖化強度を算出した。なお、CO<sub>2</sub>については検討済みの算出方法に基づいて(燃料消費量に基づく)計算を行った。各種ガスの排出割合より船舶運航に伴う温室効果ガス排出の特性を把握した。

### 3.4 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>排出量の将来予測

3.1で作成したモデルをもとに、2020年までのCO<sub>2</sub>排出量の将来予測を行った。

荷動きの予測については、過去のトレンド及びOECD諸国のGDP将来予測などから、複数のケースを設定した。また、将来の解撤量については、MARPOL条約の最新の規則内容を盛り込むなど、周辺状況を取り込むように留意した。

### 3.5 外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの排出量削減対策に関する調査

#### 3.5.1 CO<sub>2</sub>削減対策の評価とその実用可能性の調査

平成11年度事業で、抽出された有望と考えられるソフト・ハードの技術についてCOPの第一次評価目標年の初年度である2008年までの実船への適応可能性に着目し、短期的、中期及び長期的技術に大別して実用化に際しての問題点や適用範囲を整理した。

#### 3.5.2 CO<sub>2</sub>以外の削減対策に関する調査

上記で実態を把握するCH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、代替フロン等の温室効果ガスの排出量調査結果に基づき排出抑制対策について検討し、削減方策をとりまとめた。

### 3.6 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>削減対策に係る海外情報についての調査

海洋環境保護委員会(MEPC 45)及びばら積み液体と気体物質に関する小委員会(BLG 6)に参加し、事業成果について発表するとともに外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの排出対策等に関する動向を調査した。

### 3.7 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>など温室効果ガス削減に向けての提言

以上の調査結果を総合的に検討し、温室効果ガスの削減オプションの現実性について短期的、中期的、長期的という時間軸で個々の対策を整理し、その実現に向けて必要な技術開発要素や実施上の問題点などについてまとめた。また、いくつかの削減オプションについては、削減効果に関する定量的評価を行った。

## 4 調査結果の概要

### 4.1 外航船舶からCO<sub>2</sub>排出量の推定

タンカー及びコンテナ船については船型船齢ごとの年間運航日数・年間運航距離などのデータを基に新たな運航モデルを作成し、より実態にあったCO<sub>2</sub>排出量推定モデルを作成した。これによって推定された1997年のCO<sub>2</sub>排出量を船種別にみると、タンカーは105 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年、バルカーは111 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年、コンテナは135 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年であり、3船種の排出割合はおおよそ1/3ずつとなっていた。また、3船種のCO<sub>2</sub>排出量の合計値は351 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年であり、これは1997年のバンカー払い出しから別途推定された外航船舶のCO<sub>2</sub>排出量(375 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年)にほぼ見合う値となっている。

### 4.2 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの排出量に関する調査

#### 4.2.1 原油タンカー荷室内のCH<sub>4</sub> 濃度の測定等

原油輸送の工程は、原油積み込み時、原油揚げ荷時、原油輸送時、バラスト航海時の4フェーズに分けられ、原油積み込み時に最もCH<sub>4</sub>排出が多いことが予想された。

原油積み込み時における、荷室内のイナートガス圧力及び原油ガスの挙動についてモデルを作成し、実測値とほぼ合うことが確かめられた。その他の文献値などを用いたモデル計算から推定した運航フェーズ毎及び機関からの排出量を表Aに示した。ただし、荷役時における排出について外航船舶の運航に伴う排出量として取扱うべきか否かについては、今後陸上側との調整も含めて検討するべきであると考えられた。

表A 1997年における外航船舶の運航に伴うCH<sub>4</sub>排出量

単位:10<sup>3</sup>t/年

原油輸送に伴う排出量					機関からの 排出量	総計
積み荷時	揚げ荷時	積荷航海中	バラスト 航海中	小計		
120.5	10.1	5.9	1.3	137.9	37.3	175.2

#### 4.2.2 排ガス中のN<sub>2</sub>O濃度の計測

機関排ガス中のN<sub>2</sub>O濃度測定を実船の機関で行った。測定結果から、ISO8178モードに基づき計算される排出係数を表Bに示した。この値は、自動車用ディーゼル機関における値を基に設定されている従来のIPCCの設定値(80mg/kg-Fuel)に比較して大きく、その理由として、燃料中のN分が一部不完全燃焼による酸化により排出される可能性などが示唆された。

表B 実船計測により得られたN<sub>2</sub>Oの排出係数

主機種類	排出係数
2cycle	95 mg/kg-Fuel
4cycle	121 mg/kg-Fuel

#### 4.2.3 代替フロン類の使用実態調査

リーファーコンテナの個数、冷媒使用量・再充填量、寿命などを、コンテナメーカーへの聞き取りや資料によりまとめた。

しかし、外航海運で用いられる冷蔵・冷凍コンテナについては、冷媒のマクロな供給量や廃棄の実態を十分に把握することができなかった。財団の試算では、年間で約 $3.1\sim 5.1 \times 10^3$ tが漏洩する可能性もあると考えられた。

#### 4.3 外航船舶の運航に伴う各温室効果ガス排出量推定

外航船舶は世界中でのCO<sub>2</sub>排出量の1.7%程度を占めるものと考えられる。

CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガス(CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、代替フロンの3物質)の排出量の算出は、基礎的な測定データや統計値の不備などから多くの仮定に基づかざるを得ない。またCH<sub>4</sub>及び代替フロンについては、港湾内やふ頭上における排出量を外航船舶の運航に伴う排出とするか、陸上の排出量とするか、今後COP(気候変動枠組条約締結国会議)などの場で議論する必要があると考えられた。

これら3物質をCO<sub>2</sub>換算でみた場合、外航船舶の運航に伴って排出される温室効果ガス全体に占める割合は4%程度になるものと考えられ、特に冷蔵・冷凍コンテナからの排出割合は意外に大きく、1~2%を占めていると推定された(表C)。

外航船舶からの温室効果ガス排出削減を検討する場合、その主体をなすCO<sub>2</sub>に着目することは当然であるが、これら3物質の温室効果ガスについても適切な措置を講ずることにより、外航船舶から排出される温室効果ガスの数%が削減可能であると考えられる。とりわけHFCsについては、今後の加工食品輸送の増加等により、リーファーの需要量が大きく伸びることを考え合わせると、将来の排出量は増大する可能性が大きく、CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの削減方策検討も今後の重要な課題であると考えられる。

表C 外航船舶の運航に伴う温室効果ガス排出概算値(1997年ベース)

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFCs
温暖化係数	1	21	310	1,700
船舶からの排出量(10 <sup>3</sup> t)	373,100	175.2	10.0	(3.1-5.1)
CO <sub>2</sub> 換算値(10 <sup>6</sup> t)	373.1	3.7	3.1	(5.2-8.7)
温室効果ガス排出量合計値(10 <sup>6</sup> t)	385.1-388.6			
温室効果ガス排出量に占める割合	96.0-97.0%	1.0%	0.8%	1.2-2.2%

CO<sub>2</sub>以外の3ガス排出量は試算であり、また港湾荷役時あるいはふ頭上での排出量を含む。

#### 4.4 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>排出量の将来予測

4.1で算定した船種、船型、船齢ごとのCO<sub>2</sub>排出量推定モデルに、荷動きの将来予測を組み合わせ、2020年までのCO<sub>2</sub>排出量の将来予測を行った。その結果、荷動き量が少ないlower caseにおいては40%程度、荷動き量が多いupper caseにおいて75%程度の燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量の伸びが予想された。

表D 1997年と2020年における荷動きとCO<sub>2</sub>排出量の比較

ケース	船舶が取り扱う荷動き (10 <sup>9</sup> トンマイル/年)	船舶の燃料消費量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	船舶からのCO <sub>2</sub> 総排出量 (10 <sup>6</sup> t-CO <sub>2</sub> /年)	単位貨物量当りのCO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /トンマイル)	
1997年(a)	25,948	124	373	0.0144	
2020年 (b)	upper case	45,364	217	650	0.0143
	lower case	35,975	172	516	0.0143
b/a-1	upper case	74.8 %	74.2 %	74.2 %	-0.4 %
	lower case	38.6 %	38.3 %	38.3 %	-0.2 %

不明分の燃料消費量を含む

#### 4.5 外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの排出量削減対策に関する調査

船舶輸送は、他の輸送機関と比較すると、一度に大量の輸送ができるスケールメリットを持ちあわせた輸送手段である。運航経営上において、燃料費はランニングコストの大半を占めていることから、「輸送量あたりの燃料消費量」である輸送エネルギー効率の向上には、これまで多くの努力が払われてきており、同船型同船種で見た場合、1980年代半ばまでに輸送エネルギー効率は40~60%程度の改善がなされてきた。しかしながら近年は、高速輸送を望む荷主のニーズへの対応などから、全体として輸送エネルギー効率の改善は頭打ち、若しくは若干悪化の傾向が見られている。

外航船舶からの温室効果ガス排出量の大部分を占めるCO<sub>2</sub>排出削減のためには、輸送エネルギー効率の改善が不可欠である。今後有望な輸送エネルギー効率改善策としては、短期的にはプロペラボスキャップフィン(PBCF)などに代表される推進器の改善、中期的には燃料転換とマイクロバブルなど粘性抵抗の低下を図る技術があり、また長期的には燃料電池、天然ガス改質船用エンジンなど、機関の大幅なコンセプト変更が考えられた。特に推進器の改善技術については、広範な船舶を対象にレトロフィットも可能であることから、技術の早急な普及が望まれると考えられた。

CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスに関しては、例えば、タンカーの荷室への積み込み時に発生するCH<sub>4</sub>は陸上側施設との連携で大きく削減できると考えられる。LNG船と同様のクローズドカーゴシステムは、既に一部の国では採用されており、国内の原油備蓄基地など陸側施設への普及が待たれるところである。また、冷凍コンテナを含む船舶の冷凍施設からのHFCsについても、管理の厳格化、陸上施設での封入レベルの向上技術等の応用により、排出削減が可能であると考えられる。CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの削減効果は、仮に排出量が約半量削減できれば、単位貨物量当たりのCO<sub>2</sub>排出量に換算して2%程度の削減効果が見込めることになり、重要な対策課題であると考えられた。

#### 4.6 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>削減対策に係る海外情報についての調査

外航船舶の運航に伴い排出されるCO<sub>2</sub>等の温室効果ガスについて、IMOでは海洋環境保護委員会(MEPC)において削減に向けての議論を1999年3月に開催されたMEPC44より開始しており、既に外部委託した技術レポートが提出されている。2002年に開催されるMEPC47にて外航船舶が

らの温室効果ガス削減方策を検討するワーキンググループを設置し、議論を本格化させることが決定している。

ノルウェーなどから、技術的な対策技術の強制措置といった方策だけで同ガスの削減を図ることは困難であり、市場原理に基づく方策の導入が必要であるといった提案が出始めており、技術的検討以外に、CDM及び船舶間での排出権取引など市場原理に基づく削減方策も議論する時期にあると考えられた。

#### 4.7 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>など温室効果ガス削減に向けての提言

外航海運は、輸送エネルギー効率の面から見ても極めて優れた輸送機関である。その輸送活動に伴う温室効果ガスの排出は、基本的には各船舶の輸送エネルギー効率と輸送する貨物の輸送総量に依存する。

前者の輸送エネルギー効率の改善のためには、比較的速やかに導入可能な短期的削減方策(たとえば高船齢船の早期代替、推進器の改善技術の広範な普及、CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスに対する対策)により、本調査において第一評価基準として掲げた単位輸送量当たりの温室効果ガスを6%削減するという目標は概ねクリアできるものと予想された。中長期的な効率の改善については、LNGや水素等の代替燃料を用いた機関やマイクロバブル等による抵抗低減技術の導入により、さらに15%程度の改善が可能であると考えられ、外航帆走商船、天然ガス改質船用セラミックエンジン、燃料電池推進船等といった技術の開発研究も既に着手されている。

一方、外航船舶で輸送される貨物総量は、世界の経済成長とともに全体としては着実に増加していくことが予想される。その結果として、前述したようなさまざまな技術を個々の船舶に導入したとしても、これによる輸送エネルギー効率の改善効果は外航船舶全体としての貨物総量の伸びに相殺されてしまい、本調査において第二評価基準として掲げた温室効果ガスの排出総量の6%削減を達成することは極めて困難であると考えられた。

これを解決するための一層の削減には、減速航行といったような大胆な手を打つ必要がある。しかしながら、こういった方策を実施に移すためにはこれを受認する社会的なコンセンサスの形成が不可欠である。また、他の輸送機関を含めた環境税の導入等、減速航行に対してインセンティブを付与する実効性のある制度の整備が必要である。

このように、外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの排出総量を削減する事には極めて大きな困難が伴うが、まず 既存の削減技術の導入や輸送エネルギー効率の悪い老齢船の代替等、すぐにも実行に移すことができる対策について、IMOにおける国際的な枠組みの制定に向けて早急に取り組むとともに、 将来のさらなる削減に必要な先進的な技術開発を促進するために、環境税等を財源とした研究開発プロジェクトへの支援やクリーン開発メカニズム(CDM)の制度化によるインセンティブの付与等、必要な環境整備に取り組む一方、 モーダルシフトによる輸送機関全体での排出総量削減を図るために、グリーン調達税制や環境会計の導入等により、荷主側がモーダルシフトを進めやすいような環境条件を整備する必要があるものと考えられた。



## ・ 調査の内容



# 本報告書における記号一覧

## カテゴリー

$i$	船種クラス。タンカー、バルカー、コンテナ船の三種類。
$j$	船型クラス。タンカー、バルカーでは重量トン(DWT)。コンテナ船では、積載可能量(TEU)。
$k$	船齢(年)。
$m$	西暦年。
$p$	航路。

## 用語

$A_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における1日あたりの最大輸送可能量(タンカー・バルカーではトンマイル/日、コンテナ船ではTEUマイル/日)。
$C_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の1隻あたり1日あたりの燃料消費率(t-Fuel/隻・日)。
$EFCO2$	単位燃料量あたりのCO <sub>2</sub> 排出係数(kg-CO <sub>2</sub> /kg-Fuel)。
$EMCO2_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年におけるCO <sub>2</sub> 排出量(t-CO <sub>2</sub> /年)。次の式で表される。 $EMCO2 = EFCO2 \times P$
$EX_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における残存率。
$FUEL$	今回設定した航海速度時の1日あたり燃料消費量(t-Fuel/日)。
$FUEL_0$	1日あたり燃料消費量(t-Fuel/日)。ただし日本船舶明細書記載値。
$Ho$	燃料発熱量(kcal/kg-Fuel)。
$K_{ijk}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の1隻あたりの積載可能量。タンカー・バルカーではDWT/隻。コンテナ船ではTEU/隻。
$K'_{ijk}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の1隻あたりのモデル上の積載量。タンカー・バルカーではDWT/隻。コンテナ船ではTEU/隻。バラスト水・燃料等の積み込み量(トン)を積載可能量( $K$ )から除いた値。コンテナ船では、積荷率を乗じた値。次の式で表される。船舶に積み込んだ荷物の量( $K'$ ) = $K \times$
$P_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における年間燃料消費量(t-Fuel/年)。
$RC_{ijk}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の燃料消費率( $C$ )の削減割合。次の式で表される。 $RC_{ijk} = 1 - \text{導入前の燃料消費率} \div \text{導入後の燃料消費率}$
$RT_{ijk}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の平均輸送エネルギー効率。タンカー・バルカーではt-Fuel/トンマイル、コンテナ船では t-Fuel/TEUマイル。次の式で表される。 $RT = P \div TR$
$R$	減速割合。減速航行時の削減割合。次の式で表される。 $R = \text{減速前の平均運航速度} \div \text{減速後の平均運航速度}$
$S_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における総隻数。
$SPD$	今回設定した航行速度(knt)。
$SPD_0$	満載時の航行速度(knt)。ただし、船舶明細書記載値。
$TC_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における総輸送容量。タンカー・バルカーではDWT、コンテナ船ではTEU。次の式で表される。 $TC = K \times S$
$TB_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における新規船腹需要量。タンカー・バルカーではDWT/年、コンテナ船ではTEU/年。
$TD_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における建造需要量。タンカー・バルカーではDWT/年、コンテナ船ではTEU/年。次の式で表される。 $TD = TB + TL$
$TL_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における解撤量。タンカー・バルカーではDWT/年、コンテナ船ではTEU/年。解撤および事故によりリプレースされる輸送容量。
$TN_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における貨物量。タンカー・バルカーではトン/年、コンテナ船ではTEU/年。
$TR_{ijkm}$	船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の $m$ 年における輸送総量。タンカー・バルカーでは、トンマイル/年、コンテナはTEUマイル/年。
$X$	年間航海日数(日/年)。
$Z$	次の式で表される。 $Z = X \times$
	積荷率(-)。
	定数(船種により異なる)。
	輸送量(トン・km)当りのエネルギー消費量(kcal/トン・km)。
	平均運航速度(マイル/日)。

## 1 外航船舶からのCO<sub>2</sub>排出量の推定

### 1.1 基本的な考え方 ~ 船舶カテゴリー別のCO<sub>2</sub>排出量算定モデルへの展開 ~

外航船舶の航行に伴って排出されるCO<sub>2</sub>の総量は、OECD等のバンカーオイル払い出し統計量から年間燃料消費量を求め、容易に概算することが可能である(1.4.2参照)。しかしながら、例えばそのうち原油タンカーがどれだけを占めているのか、バルカーはどうかといった細目を統計から知ることはできない。また、外航船舶からのCO<sub>2</sub>排出量の将来予測を行い効果的な削減方策を検討する場合、将来の輸送量の伸びが荷種によって異なることが予想されるので、船種ごとにCO<sub>2</sub>排出量の現状の推定値と予測値を求める必要がある。さらに、CO<sub>2</sub>排出抑制のための技術等では、全船舶で共通して有効な方法もあると考えられる一方、特定の船型に有効な方法もあると考えられる。従って、外航船舶からのCO<sub>2</sub>排出問題に関する研究を進めるためには、船種別等のより詳細なレベルで排出量を推定することが第一段階として必要である。

1隻の船が排出するCO<sub>2</sub>量は、当然のことながら、年間の燃料油消費量から算出できる。従って全ての船舶についてこれが報告・公開されていれば、上記課題は何の問題もないが、そのような統計(特に世界中での統計)は存在していないので、何らかの推計方法を考えなければならない。

ここで「船」というものの属性を考えてみる。1隻の船に係る属性としては、

- ・ 船種(タンカー、バルカー、コンテナ船などの区分)
- ・ 船型(大きさなど)
- ・ 船齢(建造年次でも同じ)
- ・ 機関型式(サイクル、馬力など)
- ・ 船籍
- ・ 船主 など

があげられる。CO<sub>2</sub>排出量(すなわち燃料消費量)推定を簡潔に行うために重要な主たる属性は、上記の中では上の4つ(船種、船型、船齢、機関形式)である。このうち機関形式は船種・船型でおおよそ決まっていると考えられる。また、その船が建造された年次によってもほぼ決まっている(主機換装の場合でも船種・船型に左右されるであろう)。従って、船種、船型、船齢の3カテゴリーで1隻の船のCO<sub>2</sub>排出量の違いを表現できると考えられる。すなわち、同じ載荷重量の船で、同じ年次に建造されていても、原油タンカーとコンテナ船では同距離・同重量の貨物を運んだ場合に消費する燃料消費量が異なるだろう。同様に、同じ船種であっても船型や船齢によって燃料消費量が異なるであろう。

### 1.1.1 燃料消費量を示す基本式

以上の検討を踏まえて、船舶カテゴリー別のCO<sub>2</sub>排出量を計算する基本モデルを考える。  
船種カテゴリーを*i*、船型カテゴリーを*j*、船齢カテゴリーを*k*とすると、燃料油の年間消費量をあらわす式は次のように表現される。

$$P_{total} = \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijk} = \sum_i \sum_j \sum_k (RT_{ijk} \times TR_{ijk})$$

または

$$P_{total} = \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijk} = \sum_i \sum_j \sum_k (C_{ijk} \times X_{ijk} \times S_{ijk})$$

ここで

- $P_{total}$  : 外航船舶全体での年間燃料消費量(t-Fuel/年)
- $P_{ijk}$  : 船種*i*、船型*j*、船齢*k*に属する船舶の年間燃料消費量(t-Fuel/年)
- $RT_{ijk}$  : 船種*i*、船型*j*、船齢*k*に属する船舶の平均輸送エネルギー効率(タンカー・バルカーではt-Fuel/トンマイル、コンテナ船ではt-Fuel/TEUマイル)
- $TR_{ijk}$  : 船種*i*、船型*j*、船齢*k*に属する船舶の年間輸送総量(タンカー・バルカーはトンマイル、コンテナ船ではTEUマイル)
- $C_{ijk}$  : 船種*i*、船型*j*、船齢*k*に属する船舶の1隻あたり1日あたりの燃料消費率(t-Fuel/隻・日)
- $X_{ijk}$  : 船種*i*、船型*j*、船齢*k*に属する船舶の年間航海日数(日/年)
- $S_{ijk}$  : 船種*i*、船型*j*、船齢*k*に属する船舶の総隻数

この式は単純であり、船種*i*、船型*j*、船齢*k*に属する船舶の平均的な燃費と、それに対応する単位系のカテゴリー別稼働量(輸送量や航海時間等)を掛ければ、船種*i*、船型*j*、船齢*k*の年間燃料消費量がわかることを意味している。従って、すべて合計すれば外航船舶全体での年間燃料消費量がわかるし、船種別集計、船型別集計、船齢別集計も当然可能である。

実際の解を求める場合には、単位系の揃ったデータがあればそれを使えばよいわけであるが、概して燃費の単位系に合致する稼働量の数値がない場合が多く、データの単位系を揃えるための様々な作業が必要となる。

### 1.1.2 船舶の輸送量を示す基本式

次に船舶による「輸送」をどのように数式的に表現するかを考えてみる。

基本として、1隻の貨物船が一回の航海で輸送した量を考えてみる。その船の載荷可能量(DWT/隻もしくはTEU/隻)を*K*、正味の積荷率を  $\alpha$ 、年間航海日数を*X*、平均運航速度を  $V$  とする。すると、この船が一航海で輸送した量は、

$$(\text{輸送量}) = K \times \alpha \times X \times V$$

で表される。前半部分、すなわち  $K \times \alpha$  はその航海で運んだ重量もしくはコンテナの個数を

示し、後半の $X \times$  は時間×速度であるから輸送距離を表わす。すなわち輸送量は重量×距離の単位系で表され、通常タンカーやバルカーでは「トンマイル」で、コンテナ船では「TEUマイル」で表現されることになる。

以上の考え方は、前述のカテゴリー別に展開したときも全く同じことになる。すなわち、

$$\begin{aligned} TR_{ijk} &= K_{ijk} \times \alpha_{ijk} \times X_{ijk} \times v_{ijk} \times S_{ijk} \\ &= A_{ijk} \times \alpha_{ijk} \times X_{ijk} \end{aligned}$$

ここで、

$TR_{ijk}$  : 船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の年間輸送総量(前出)

$K_{ijk}$  : 船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の1隻あたりの載荷可能量(DWT/隻もしくはTEU/隻)

$\alpha_{ijk}$  : 船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の年間平均積荷率

$X_{ijk}$  : 船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の年間平均航海日数(前出)

$v_{ijk}$  : 船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の平均運航速度(マイル/日)

$S_{ijk}$  : 船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の総隻数

$A_{ijk}$  : 船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する全船舶の1日あたりの最大輸送可能量(トンマイル/日、またはTEUマイル/日)

この式では、 $A_{ijk} (= K_{ijk} \times v_{ijk} \times S_{ijk})$  がカテゴリー $i, j, k$ に属する全船舶の1日あたりの最大輸送可能量(トンマイルもしくはTEUマイル)を意味し、 $A_{ijk} \times \alpha_{ijk}$  が正味の1日あたりの平均輸送量を表している。更に $X_{ijk}$ を乗じることにより、カテゴリー $i, j, k$ に属する全船舶での年間輸送総量が求められる。

以上より、船舶による輸送総量 $TR$ は次のように表現される。

$$\begin{aligned} TR &= \sum_i TR_i \\ &= \sum_i \left( \sum_j \sum_k TR_{ijk} \right) \\ &= \sum_i \sum_j \sum_k \left( A_{ijk} \times \alpha_{ijk} \times X_{ijk} \right) \\ &= \sum_i \sum_j \sum_k \left( K_{ijk} \times \alpha_{ijk} \times X_{ijk} \times v_{ijk} \times S_{ijk} \right) \end{aligned}$$

なお、 $TR_{ijk}$ と $X_{ijk}$ は正比例関係にあり、上記式より、

$$\begin{aligned} X_{ijk} &= \frac{TR_{ijk}}{\left( K_{ijk} \times \alpha_{ijk} \times v_{ijk} \times S_{ijk} \right)} \\ &= \frac{TR_{ijk}}{\left( A_{ijk} \times \alpha_{ijk} \right)} \end{aligned}$$

である。

### 1.1.3 船舶カテゴリー別の燃料消費量・CO<sub>2</sub>排出量の基本式

以上より、船舶の運航と燃料消費量を表現する基本モデル式は次のとおりとなる。

$$\begin{aligned}P_{ijk} &= C_{ijk} \times X_{ijk} \times S_{ijk} \\ &= C_{ijk} \times \left( \frac{TR_{ijk}}{A_{ijk}} \times \alpha_{ijk} \right) \times S_{ijk} \\ &= C_{ijk} \times \left( \frac{TR_{ijk}}{K_{ijk}} \times \alpha_{ijk} \times v_{ijk} \times S_{ijk} \right) \times S_{ijk}\end{aligned}$$

または

$$\begin{aligned}P_{ijk} &= RT_{ijk} \times TR_{ijk} \\ &= RT_{ijk} \times \left( A_{ijk} \times \alpha_{ijk} \times X_{ijk} \right) \\ &= RT_{ijk} \times \left( K_{ijk} \times \alpha_{ijk} \times X_{ijk} \times v_{ijk} \times S_{ijk} \right)\end{aligned}$$

$P_{ijk}$ について、 $i, j, k$ の和をとれば、外航船舶が一年間に消費する燃料の量になるし、 $j, k$ の和をとれば船種別の燃料消費量( $P_i$ )になる。

従って、単位燃料量あたりのCO<sub>2</sub>排出係数を $EF_{CO_2}$ とすれば、カテゴリー別のCO<sub>2</sub>排出量 $EM_{CO_2ijk}$ は $EF_{CO_2} \times P_{ijk}$ と表現され、外航船舶によるCO<sub>2</sub>の総排出量は $i, j, k$ での総和となる。以上をまとめると、外航船舶の燃料消費量ならびにCO<sub>2</sub>排出量を計算する過程は図 1.1-1のとおりとなる。



## 1.2 基本的な数値の整理

さて、モデルを解いていくためには様々なデータが必要となるが、基本となるのは輸送量、船腹量、燃料消費率の3つである。それぞれのデータは船種別・船型別・船齢別に示されているわけではないので、適切な仮定をおいてカテゴリー別に振り分けていく必要がある。

なお船種については、余り細かく分けると煩雑であること、入手できる統計データの区分等を考慮して、タンカー、バルカー、コンテナ船の3種に大別して扱うこととした。

### 1.2.1 外航船舶による世界の年間貨物量及び年間輸送総量

輸送量については、タンカーが運ぶ原油及びその他の石油製品、バルカーが運ぶ鉄鉱石その他のドライバルクは、年間に輸送した重量ならびに輸送トンマイルとして統計が得られている。一方、コンテナ輸送については、コンテナヤードを通過するコンテナ数は精度の高い統計があるものの、輸送重量や輸送トンマイルの統計はない。

表 1.2-1に1997年の世界での年間貨物量( $TN_i$ )及び年間輸送総量( $TR_i$ )を、荷種別の輸送トン及び輸送トンマイルとして示した。参考として、コンテナについても重量換算したものを併せて掲載した。コンテナ年間輸送総量の重量推定方法は1.2.2に示す通りである。

表 1.2-1 バルク貨物とコンテナ貨物の年間貨物量( $TN_i$ )及び年間輸送総量( $TR_i$ ) (1997年)

荷種	年間貨物量( $TN_i$ ) ( $10^6$ トン)	年間輸送総量( $TR_i$ ) ( $10^9$ トンマイル)	平均輸送距離 ( $10^3$ マイル)
Crude Oil & Oil Products	2,288	11,610	5.07
Crude Oil	1,773	9,321	5.26
Other Oil Products	515	2,289	4.45
Dry Bulk	1,144	6,245	5.4
Iron ore	432	2,520	5.8
Coal	461	2,359	5.12
Grain	167	956	5.73
Bauxite and Alumina	54	282	5.24
Phosphate	31	127	4.13
計	3,431	17,855	5.20
コンテナ輸送総量(推定値)	491	3,520	7.16

造船業基盤整備事業協会提供資料(2000)、Lloyd's Register of Shipping (2000)「WORLD FLEET STATISTICS 1999」より作成。

コンテナ取扱量推定方法については、1.2.2を参照。

なお、平均輸送距離は(平均輸送距離)=(年間輸送総量( $TR_i$ ))÷(年間貨物量( $TN_i$ ))から算出した。

### 1.2.2 コンテナの年間貨物量と年間輸送総量の推定

コンテナの貨物量及び輸送総量はContainerisation International Year Bookの統計が基本となる。これは、世界のコンテナヤードにおける取り扱い実績に基づくもので、資料としては精度が高く、発着地別にも集計されているが、TEUマイルベースの値は示されていない。

Containerisation International Year Bookの統計値は、コンテナヤードを通過したコンテナの個数を、陸路も含めて発着ごとにカウントしている。従って、このままの数値を用いると、図 1.2-1に示すように、単純な発着地間の運航は統計上のカウントの0.25倍と考えられる。また、近年はシンガポールなどハブ港での積み替えがあり、この場合はハブ港が1つの場合は実際の運航は統計上のカウントの0.33倍、ハブ港が二つの場合と同じく0.375倍になる(図 1.2-1参照)。以上のことを考慮し、ここではContainerisation International Year Bookに記載のコンテナ取り扱い量に<0.3>を乗じたものをコンテナ船の貨物量と仮定した(表 1.2-2)。

Containerisation International Year Bookによると、1997年の世界全体でのコンテナヤード通過コンテナ数は $163,744 \times 10^3$ TEUである。従って、年間貨物量( $TN$ )はこれに0.3を乗じた量、すなわち $49,123 \times 10^3$ TEUとなる。表 1.2-2ではコンテナの貨物量を発地・着地別に示しているが、これはContainerisation International Year Bookに示されている地域間の輸送比率(運輸省海上交通局、1999)に基づいて、1997年のコンテナ貨物量を地域間に分割したものである。表 1.2-2によれば、アジア発着の貨物量が大きな割合を占めており、シンガポール、香港、高雄など、アジアのハブ港を中心とした荷動きの実態を適切に反映していると考えられる。

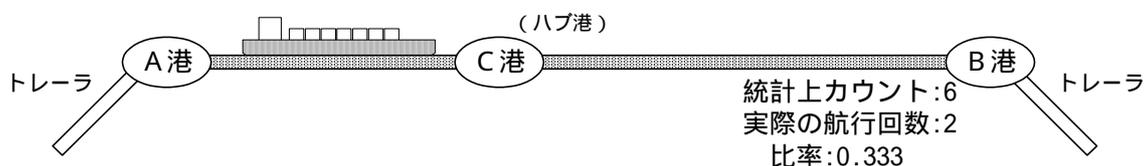
コンテナ輸送については輸送距離を考慮した統計値は存在しないので、地域間の平均輸送距離を別途推定する必要がある。そこで、Fearnleys World Bulk Tradesのバルクカーゴに関する発着地別の輸送トン及び輸送トンマイルを用いて、地域間の平均輸送距離を求め、これをもってコンテナの地域間輸送距離と仮定した(表 1.2-3)。これにより、TEUマイルベースの年間輸送総量( $TR$ )は表 1.2-2に表 1.2-3を乗じることで求められる。TEUマイルベースの年間輸送総量は表 1.2-4に示すとおりである。

なお、TEUは個数であるから、運航業者への聞き取りにより10トン/TEUで重量換算することとした。表 1.2-1に示したコンテナ年間輸送総量の推定値は、表 1.2-2に示したTEU総計及び表 1.2-4に示したTEUマイル総計に10トン/TEUを乗じたものである。

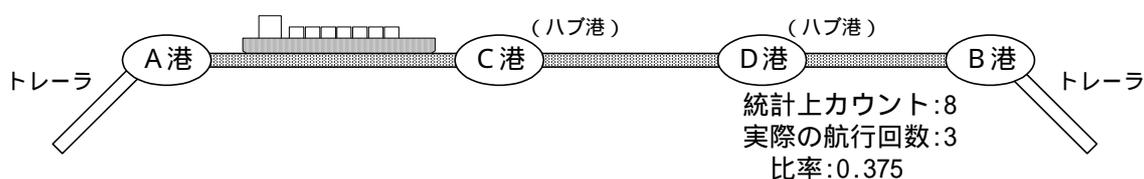
ケース1：寄港地が2個所の場合



ケース2：寄港地が3個所の場合



ケース3：寄港地が4個所の場合



取扱いコンテナ個数×0.3 貨物量 (TN)

図 1.2-1 コンテナ船の航行回数の考え方

表 1.2-2 1997年におけるコンテナの貨物量(TN)

単位:10<sup>3</sup> TEU/年

着地	発地				TOTAL
	北米	欧州	南米	アジア	
北米	-	2,606	1,757	7,321	11,684
欧州	2,196	-	-	4,613	6,809
南米	1,714	-	-	-	1,714
アジア	5,081	3,602	-	-	8,683
小計	8,990	6,209	1,757	11,933	28,889
地域不特定分					
アジア域内					8,917
その他					11,318
総計					49,123
<参考>「Containerisation International YearBook,1999」					163,744

運輸省海上交通局(1999)「平成11年版 日本海運の現況」、Containerisation International YearBook,1999より作成。

「-」で示された区分は統計上「地域不特定分(アジア域内, その他)」で整理されている。

表 1.2-3 コンテナの地域間平均輸送距離の仮定値

単位:10<sup>3</sup>マイル

着地	発地			
	北米	欧州	南米	アジア
北米	-	4.5	6.0	6.2
欧州	4.5	-	-	16.4
南米	6.0	-	-	-
アジア	6.2	16.4	-	-
地域不特定分				
アジア域内				4.7
その他				4.9

表中の数字はFearnleysによるもので、(年間輸送総量(TR))÷(年間貨物量(TN))から算出した。「-」は統計上「地域不特定分(アジア域内, その他)」で整理されている。

表 1.2-4 コンテナの年間輸送総量(TR)

単位:10<sup>8</sup> TEUマイル

着地	発地				TOTAL
	北米	欧州	南米	アジア	
北米	-	117	105	454	676
欧州	100	-	-	757	857
南米	103	-	-	-	103
アジア	320	591	-	-	911
小計	523	708	105	1,211	2,547
地域不特定分					
アジア域内					419
その他					554
総計					3,520

表 1.2-2の航路ごとのコンテナ貨物量と表 1.2-3の航路距離を乗じて算出した。(ただし、表中の値は有効数値三桁で四捨五入)「-」は統計上「地域不特定分(アジア域内, その他)」で整理されている。

### 1.2.3 外航船舶の船腹量

総隻数については、タンカー及びバルカーはFearnleys World Bulk Fleetにより、コンテナはContainerisation International Year Bookより、船型・船齢別に整理できる。タンカー、バルカー及びコンテナ船の船腹量は表 1.2-5～表 1.2-7に示す通りである。

表 1.2-5 世界に現存するタンカーの船型・船齢構成( $S_{ijk}$ )

単位:隻

DWT(10 <sup>3</sup> トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	185	82	48	21	34
25	-50	303	146	145	127	157
50	-80	61	120	58	40	10
80	-120	117	97	82	125	103
120	-200	117	17	14	83	58
200	-320	132	9	28	113	91
320	+	43	9	-	-	-
TOTAL		960	479	375	509	453
						2,776

Fearnleys World Bulk Fleet January 1999より作成した1999年1月時点のデータ。備蓄用タンカー隻数(21隻)はあらかじめ除外した。「-」はその船型の船が存在しないことを示す。

表 1.2-6 世界に現存するバルカーの船型・船齡構成( $S_{ijk}$ )

単位:隻

DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10 -25	612	250	154	63	166	1245
25 -50	803	420	660	176	561	2620
50 -80	209	211	154	129	317	1020
80 -100	14	10	4	5	10	43
100 -120	18	9	1	-	2	30
120 -200	35	57	70	93	156	411
200 -320	1	6	12	16	5	40
320 +	-	-	1	1	2	4
TOTAL	1692	963	1056	483	1219	5413

Fearnleys World Bulk Fleet January 1999より引用した1999年1月時点のデータ。

「-」はその船型・船齡カテゴリーの船が存在しないことを示す。

表 1.2-7 世界に現存するフルコンテナ船の船型・船齡構成( $S_{ijk}$ )

単位:隻

可能搭載量(TEU/隻)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
1000 未満	584	352	266	261	251	1,714
1000 以上 - 1999 以下	197	153	122	115	202	790
2000 以上 - 2999 以下	29	56	57	53	171	366
3000 以上 - 3999 以下	5	29	29	37	78	177
4000 以上 - 4499 以下	-	-	15	30	41	86
4500 以上	-	-	11	32	13	56
TOTAL	815	590	500	528	756	3,189

1998年11月現在のデータ。「-」はその船型・船齡カテゴリーのコンテナが存在しないことを示す。

#### 1.2.4 燃料消費率

ここでは、カテゴリー*i*、*j*、*k*に属する船舶の1隻1日あたりの燃料消費量( $C_{ijk}$ )と定義する。燃料消費率については、輸送量や船腹量に相当するような統計データは存在しない。そこで、日本船舶明細書に記載の1日あたり燃料消費量データより、タンカー、バルカー、コンテナの航行1隻1日あたり燃料消費量( $C_{ijk}$ )を算出した(表 1.2-8～表 1.2-10)。計算過程は付録1に示す通りである。

表 1.2-8 タンカーの平均的な燃料消費率( $C_{ijk}$ )の推定値

単位:t-Fuel/隻・日

DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10 -25	19	17	16	13	12
25 -50	24	23	22	21	20
50 -80	34	32	31	31	29
80 -120	44	42	40	41	38
120 -200	70	64	55	56	52
200 -320	111	105	92	100	96
320 +	151	152	-	-	-

「-」はその船型・船齡カテゴリーの船が存在しないことを示す。

表 1.2-9 バルカーの平均的な燃料消費率( $C_{ijk}$ )の推定値

(A)鉄鉱石運搬船

単位:t-Fuel/隻・日

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	22	25	22	21	23
25	-50	32	28	21	20	22
50	-80	43	33	26	25	28
80	-100	50	44	31	29	32
100	-120	58	46	45	43	47
120	-200	89	77	58	50	55
200	-320	80	70	50	50	50
320	+	-	-	50	50	50

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

(B)石炭運搬船及びその他のバルカー

単位:t-Fuel/隻・日

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	23	24	17	20	20
25	-50	32	27	21	21	22
50	-80	41	36	26	25	25
80	-100	50	35	32	34	36
100	-120	56	47	46	41	43
120	-200	72	62	50	54	53
200	-320	-	-	-	-	-
320	+	-	-	-	-	-

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

表 1.2-10 コンテナ船の平均的な燃料消費率( $C_{ijk}$ )の推定

単位:t-Fuel/隻・日

可能搭載量(TEU/隻)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
1000 未満	60	55	53	40	40
1000 以上 - 1999 以下	60	55	53	40	40
2000 以上 - 2999 以下	74	68	66	53	54
3000 以上 - 3999 以下	87	81	79	66	67
4000 以上 - 4499 以下	101	94	91	79	81
4500 以上	-	-	104	92	94

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

1.3 各船種別の燃料消費量の推定

タンカー、バルカー、コンテナとも、表 1.2-5～表 1.2-10に示したように、船型・船齢別の隻数( $S_{ijk}$ )ならびに燃料消費率( $C_{ijk}$ )が推計できているので、それぞれの船種での燃料消費量を計算するためには、船種ごとに船型・船齢別の年間航海日数( $X_{ijk}$ )を推定すれば良い。年間航海日数( $X_{ijk}$ )を得られれば、前出の式、すなわち、

$$\begin{aligned}
 P_{ijk} &= C_{ijk} \times X_{ijk} \times S_{ijk} \\
 &= C_{ijk} \times \left( \frac{TR_{ijk}}{A_{ijk}} \times \alpha_{ijk} \right) \times S_{ijk} \\
 &= C_{ijk} \times \left( \frac{TR_{ijk}}{K_{ijk}} \times \alpha_{ijk} \times v_{ijk} \times S_{ijk} \right) \times S_{ijk}
 \end{aligned}$$

に基づいて全てのカテゴリーにおける燃料消費量( $P_{ijk}$ )が算出可能である。

### 1.3.1 タンカー

タンカーでは、原油と石油製品を輸送しているが、4章で示すように将来の輸送総量の伸びが、それぞれで異なると考えられたため個別に取り扱うこととした。

#### (1) 原油及び石油製品の輸送に従事する隻数

原油は主に大型のタンカーが輸送することから、12万DWT以上のタンカーは全て原油輸送に従事することとした。12万DWT未満のタンカーは、各船型・船齢カテゴリーの半数が原油輸送に、残りの半数が石油製品輸送に従事するものとした。以上の考え方で、原油輸送に関わるタンカー及び石油製品輸送に関わるタンカーの船型・船齢構成をそれぞれ、表 1.3-1、表 1.3-2に示した。

表 1.3-1 原油輸送に従事するタンカーの船型・船齢構成( $S_{jk}$ )

単位:隻

DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10 -25	93	41	24	11	17	185
25 -50	152	73	73	64	79	439
50 -80	31	60	29	20	5	145
80 -120	59	49	41	63	52	262
120 -200	117	17	14	83	58	289
200 -320	132	9	28	113	91	373
320 +	43	9	-	-	-	52
TOTAL	625	258	209	353	301	1,745

表 1.2-5より作成。

「-」はその船型の船が存在しないことを示す。

表 1.3-2 石油製品輸送に従事するタンカーの船型・船齢構成( $S_{jk}$ )

単位:隻

DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10 -25	93	41	24	11	17	185
25 -50	152	73	73	64	79	439
50 -80	31	60	29	20	5	145
80 -120	59	49	41	63	52	262
120 -200	-	-	-	-	-	0
200 -320	-	-	-	-	-	0
320 +	-	-	-	-	-	0
TOTAL	333	223	167	157	152	1,031

表 1.2-5より作成。

「-」はその船型の船が存在しないことを示す。

(2) 原油の輸送による年間燃料消費量

計算に用いるデータを整理すると表 1.3-3の通りとなる。

表 1.3-3 モデル式中パラメータの取り扱い( $i$ :原油輸送に従事するタンカー)

パラメータ	パラメータの説明	モデルでの取り扱い
$C_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の燃料消費率(t-Fuel/日/隻)	日本船舶明細書からの <b>推定値</b>
$X_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の年間航海日数(日/年)	求めるべき <b>計算結果</b>
$TR_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の輸送量(t-マイル/年)	資料からの <b>推定値</b>
$K_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の荷荷可能量(トン/隻)	<b>統計値</b> (ただし仮定をおいて補正)
$S_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の隻数	<b>統計値</b> (ただし仮定をおいて補正)
$\rho_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の積荷率	<b>仮定</b>
$V_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の平均運航速度(マイル/日)	日本船舶明細書に基づく <b>仮定値</b> 。カテゴリ- $j,k$ の積荷航海時の平均運航速度(knt)をマイル/日に変換

荷荷可能量

船型・船齢カテゴリ別のDWTの合計値を隻数で除することによって、船型・船齢別の荷荷可能量( $K_{jk}$ )を求めた(表 1.3-4)。船型・船齢カテゴリ別のDWT及び隻数は、Fearnleys World Bulk Fleet 1999に記載されている値を用いた。この資料は、1.2.3で総隻数を船型・船齢別に整理する際に用いたものである。

表 1.3-4 原油輸送に関わるタンカーの荷荷可能量( $K_{jk}$ )

単位:トン/隻

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	18,181	17,921	17,709	15,179	15,625
25	-50	34,723	37,585	39,569	40,994	43,313
50	-80	66,835	64,446	67,780	71,719	74,375
80	-120	95,540	93,105	94,588	99,449	100,176
120	-200	131,436	141,667	128,174	135,408	136,781
200	-320	254,861	251,852	232,738	258,260	275,030
320	+	371,619	377,778	-	-	-

Fearnleys World Bulk Fleet January 1999より作成。係留備蓄用の船は除外済み。  
「-」はそのカテゴリの船が存在しないことを示す。

積荷率

タンカーの運航のためには、バラスト水や輸送のための燃料など荷物以外の積載も必要である。ここでは、オペレーターからの聞き取り等により、正味の荷荷可能量を12万DWT以上の大型タンカーでは9割、それ以下の中小型タンカーでは8割と仮定した。また、タンカーでは、往航(積み出し地まで)はバラスト水を積み航海し、復航では原油を満載するというパターンが一般的と考えられるため、計算上すべての船型・船齢において荷荷可能量を1/2倍して取り扱う必要がある。以上の考え方から、積荷率( $\rho_{jk}$ )は次のように仮定した。

12万DWT以上の船: $0.9 \times 0.5 = 0.45$

12万DWT未満の船: $0.8 \times 0.5 = 0.40$

## 平均運航速度

現実の運航では、天候、潮流、積荷量などにより運航速度が変化すると考えられるが、全船舶について詳細を得ることは困難である。ここでは、日本船舶明細書に示された各船舶の航海速度を利用して、平均運航速度( $v_{jk}$ )の設定を行った。

まず、船舶明細書に記載された航海速度は新造時の運航速度であり、原則として全船舶が航海速度で運航されると考える。次に経年劣化を考え、同負荷で運航した場合の速度低下を、専門家等からの聞き取りにより、約5%/10年と仮定した。なお、バラスト航海と積荷航海では同じ平均運航速度( $v_{jk}$ )と仮定した。

以上に基づいてタンカーの平均運航速度(knt)を表 1.3-5に示す通り仮定し、これをマイル/日に変換して平均運航速度( $v_{jk}$ )を求めた。

表 1.3-5 原油輸送に関わるタンカーの平均運航速度

単位:knt

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0
25	-50	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0
50	-80	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0
80	-120	13.5	13.5	14.0	15.0	16.0
120	-200	13.5	13.5	14.0	15.0	16.0
200	-320	13.5	13.5	14.0	15.0	16.0
320	+	13.5	13.5	-	-	-

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

## 1日あたりの最大輸送可能量

以上のデータより、まずタンカー全体の船型・船齢別の1日あたりの最大輸送可能量( $A_{jk}$ )を算出する。最大輸送可能量は次の式で求められる。タンカーの最大輸送可能量を表 1.3-6に示した。計算に用いた表は、下記に併せて示した。

$$A_{jk} = K_{jk} \times v_{jk} \times S_{jk}$$

$A_{jk}$  :1日あたりの最大輸送可能量(トンマイル/日)

$K_{jk}$  :カテゴリー $jk$ の載荷可能量(トン/隻) (表 1.3-4より)

$v_{jk}$  :カテゴリー $jk$ の速度(マイル/日) (表 1.3-5より、ただしマイル/日に変換)

$S_{jk}$  :カテゴリー $jk$ の隻数 (表 1.3-1より)

表 1.3-6 原油輸送に関わるタンカーの1日あたりの最大輸送可能量( $A_{jk}$ )

単位:10<sup>6</sup>トンマイル/日

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10	-25	444	194	122	50	89	899
25	-50	1,389	724	826	812	1,142	4,894
50	-80	538	1,021	566	448	125	2,698
80	-120	1,811	1,463	1,303	2,238	1,981	7,720
120	-200	4,982	780	603	4,046	3,046	13,458
200	-320	10,900	734	2,190	10,506	9,611	33,941
320	+	5,177	1,102	-	-	-	6,279
TOTAL		24,166	6,019	5,610	18,099	15,995	69,889

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

#### 年間輸送総量

原油の年間輸送総量( $TR$ )は既に表 1.2-1に示したが、表 1.3-7には1997年における船型・船齢別輸送総量(推定値)を示した。これは、Lloyd's Maritime Information Services(LMIS)提供のデータから(財)海事産業研究所が整備した資料に基づき、各カテゴリーへ輸送総量を割り振ったものである。

輸送総量の実績を船型船齢別に見た場合、船型別には、20万～32万DWTのVLCCタンカーが輸送総量のうち大きな割合を占めていることがわかる。船齢別には、1989年以降建造された船が50%を占めている。

表 1.3-7 原油の船型・船齢別輸送総量( $TR_{jk}$ )

単位:10<sup>9</sup>トンマイル/年

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10	-25	13	6	4	2	3	28
25	-50	43	23	26	26	37	156
50	-80	57	109	61	49	14	291
80	-120	211	171	158	273	258	1,071
120	-200	704	112	87	586	444	1,934
200	-320	1,546	106	317	1,539	1,422	4,930
320	+	750	161	-	-	-	911
TOTAL		3,325	689	654	2,475	2,178	9,321

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

造船業基盤整備事業協会(2000)<sup>1</sup>で使用されたトンベースの実績値に発地・着地別にマイル数を乗じて求めた。発地・着地別のマイル数は、海事産業研究所が整備した資料、Fearnlys (1999)<sup>2</sup>等より作成。

#### 年間航海日数

上記の～で推定したパラメータを用いて、原油を運ぶために稼動したタンカーの年間航海日数( $X_{jk}$ )を推定した(表 1.3-8)。これによると、5万DWT以上のタンカーでは250～300日程度、5万DWT未満のタンカーでは80日程度であり、実際の平均的な運航パターンを十分再現できていると考えた。

<sup>1</sup> 造船業基盤整備事業協会(2000),ダブルハル化を実施した時の船腹需給量等に関する調査

<sup>2</sup> Fearnleys (1999) 「World Bulk Fleet January 1999」

表 1.3-8 原油輸送に関わるタンカーの年間航海日数( $X_{jk}$ )

単位:日/年

DWT( $10^3$ トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	75	76	78	77	80
25	-50	78	79	80	81	82
50	-80	265	268	270	274	282
80	-120	287	289	295	297	307
120	-200	314	320	321	322	324
200	-320	315	321	322	325	329
320	+	322	325	-	-	-

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

### 年間燃料消費量の計算結果

表 1.2-8に示した燃料消費率( $C_{ik}$ )及び表 1.3-8に示した1隻あたりの年間航海日数( $X_{jk}$ )、表 1.3-1に示した隻数( $S_{jk}$ )の積から原油輸送に関わる年間燃料消費量を求めた(表 1.3-9)。

表 1.3-9 原油輸送に関わる年間燃料消費量( $P_{jk}$ )推定値

単位: $10^3$ t-Fuel/年

DWT( $10^3$ トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	133	53	30	11	16	243
25	-50	284	132	127	107	128	779
50	-80	275	515	243	170	41	1,243
80	-120	737	585	487	755	599	3,163
120	-200	2,571	349	247	1,497	978	5,641
200	-320	4,619	304	829	3,678	2,872	12,301
320	+	2,090	445	-	-	-	2,535
TOTAL		10,708	2,383	1,963	6,217	4,634	25,905

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

### (3) 石油製品の輸送による年間燃料消費量

石油製品の輸送量には比較的大型の船が従事することは少なく、ここでは12万DWT未満の船が従事するものとした(表 1.3-2参照)。

#### 載荷可能量

原油輸送の場合と同様に載荷可能量( $K_{jk}$ )を求めた(表 1.3-10)。

表 1.3-10 石油製品輸送に関わるタンカーの載荷可能量( $K_{jk}$ )

単位: トン/隻

DWT( $10^3$ トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	18,181	17,921	17,709	15,179	15,625
25	-50	34,723	37,585	39,569	40,994	43,313
50	-80	66,835	64,446	67,780	71,719	74,375
80	-120	95,540	93,105	94,588	99,449	100,176

Fearnleys World Bulk Fleet January 1999より作成。係留備蓄用の船は除外済み。

「-」はそのカテゴリーの船が存在しないことを示す。

## 積荷率

原油輸送の場合と同様に、12万DWT以上の船で0.45、12万DWT未満の船で0.40と仮定した。

## 平均運航速度

原油輸送の場合と同様に、タンカーの平均運航速度(knt)を表 1.3-11に示す通り仮定し、これをマイル/日に変換して平均運航速度( $v_{jk}$ )を求めた。

表 1.3-11 石油製品輸送に関わるタンカーの平均運航速度

単位:knt

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0
25	-50	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0
50	-80	11.0	11.0	12.0	13.0	14.0
80	-120	13.5	13.5	14.0	15.0	16.0

## 1日あたりの最大輸送可能量

原油輸送の場合と同様に次に示す式で最大輸送可能量( $A_{jk}$ )を求めた(表 1.3-12)。計算に用いた値、表等は、下記に併せて示した。

$$A_{jk} = K_{jk} \times v_{jk} \times S_{jk}$$

$A_{jk}$  :1日あたりの最大輸送可能量(トンマイル/日)

$K_{jk}$  :カテゴリー $jk$ の載荷可能量(トン/隻) (表 1.3-10より)

$v_{jk}$  :カテゴリー $jk$ の速度(マイル/日) (表 1.3-11より、ただしマイル/日に変換)

$S_{jk}$  :カテゴリー $jk$ の隻数 (表 1.3-2)

表 1.3-12 石油製品輸送に関わるタンカーの1日あたりの最大輸送可能量( $A_{jk}$ )

単位:10<sup>6</sup>トンマイル/日

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	444	194	122	50	89	899
25	-50	1,389	724	826	812	1,142	4,894
50	-80	538	1,021	566	448	125	2,698
80	-120	1,811	1,463	1,303	2,238	1,981	7,720
TOTAL		3,107	3,402	2,818	3,547	3,338	16,211

## 年間輸送総量

石油製品の輸送総量は、表 1.2-1に示したように約 $2,300 \times 10^9$ トンマイルと推定されている。しかし、12万DWT以下のタンカーについて、船型、船齢カテゴリー別の石油製品の輸送内訳については情報が全くない。そこで、表 1.3-12で示した1日あたりの最大輸送可能量( $A_{jk}$ )の比率で、石油製品の輸送量を12万DWT以下の船型・船齢カテゴリーへ割り振ることとした。石油製品の船型・船齢別輸送総量( $TR_{jk}$ )は、表 1.3-13に示した。計算に用いた値、表等は、下記に併せて示した。

表 1.3-13 石油製品の船型・船齢別輸送総量( $TR_{jk}$ )

単位:10<sup>9</sup>トンマイル/年

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	58	25	16	6	12	117
25	-50	181	94	108	106	149	638
50	-80	70	133	74	58	16	352
80	-120	240	193	175	299	274	1,181
TOTAL		549	446	372	470	451	2,289

年間航海日数

上記の ~ で推定したパラメータを用いて推定した石油製品輸送に従事したタンカーの年間航海日数( $X_{jk}$ )は、船型・船齢カテゴリーによらず一律326日と推定された(表 1.3-14)。この値は、実際の運航を十分再現していると考えた。

表 1.3-14 石油製品輸送に関わる年間航海日数( $X_{jk}$ )

単位:日/年

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	326	326	326	326	326
25	-50	326	326	326	326	326
50	-80	326	326	326	326	326
80	-120	326	326	326	326	326

年間燃料消費量の計算結果

表 1.2-8に示した燃料消費率( $C_{ik}$ )及び表 1.3-14に示した1隻あたりの年間航海日数( $X_{jk}$ )、表 1.3-2に示した隻数( $S_{jk}$ )から石油製品輸送に関わる年間燃料消費量( $P_{jk}$ )を求めた(表 1.3-15)。

表 1.3-15 石油製品輸送に関わる年間燃料消費量( $P_{jk}$ )推定値

単位:10<sup>3</sup>t-Fuel/年

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	573	227	125	45	67	1,037
25	-50	1,186	548	520	435	512	3,201
50	-80	338	626	293	202	47	1,507
80	-120	837	660	538	828	637	3,501
TOTAL		2,935	2,061	1,477	1,510	1,263	9,246

(4) タンカー全体での年間燃料消費量

タンカーの年間燃料消費量( $P_{jk}$ )は、原油輸送で $25,900 \times 10^3$ t-Fuel(表 1.3-9)、石油製品輸送で $9,200 \times 10^3$ t-Fuel(表 1.3-13)、全体で $35,200 \times 10^3$ t-Fuel(表 1.3-16)となった。

表 1.3-16 タンカーの年間燃料消費量( $P_{jk}$ )推定値

単位: $10^3$ t-Fuel/年

DWT( $10^3$ トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	706	281	155	55	83	1,280
25	-50	1,470	680	648	542	640	3,980
50	-80	613	1,141	536	372	88	2,750
80	-120	1,574	1,246	1,025	1,583	1,236	6,664
120	-200	2,571	349	247	1,497	978	5,641
200	-320	4,619	304	829	3,678	2,872	12,301
320	+	2,090	445	-	-	-	2,535
TOTAL		13,643	4,444	3,440	7,727	5,898	35,151

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

### 1.3.2 バルカー

計算に用いるデータを整理すると表 1.3-17の通りとなる。

表 1.3-17 モデル式中パラメータの取り扱い( $i$ =バルカー)

パラメータ	パラメータの説明	モデルでの取り扱い
$C_{jk}$	カテゴリー $j,k$ の燃料消費率(t-Fuel/日/隻)	日本船舶明細書からの <b>推定値</b>
$X_{jk}$	カテゴリー $j,k$ の年間航海日数(日/年)	求めるべき <b>計算結果</b>
$TR_{jk}$	カテゴリー $j,k$ の輸送量(t-マイル/年)	<b>計算結果</b>
$K_{jk}$	カテゴリー $j,k$ の載荷可能量(トン/隻)	<b>統計値</b> (ただし仮定をおいて補正)
$S_{jk}$	カテゴリー $j,k$ の隻数	<b>統計値</b> (ただし仮定をおいて補正)
$\rho_{jk}$	カテゴリー $j,k$ の積荷率	<b>仮定値(調整パラメータ)</b>
$V_{jk}$	カテゴリー $j,k$ の平均運航速度(マイル/日)	日本船舶明細書に基づく <b>仮定値</b> 。カテゴリー $j,k$ の積荷航海時の平均運航速度(knt)をマイル/日に変換

バルカーの輸送する貨物については、表 1.2-1に示したように、鉄鉱石及び石炭、穀物、ボーキサイト、リン鉱石といった荷種に細分されている。また、4章の将来予測に示すように、荷種ごとに輸送量の将来の伸びが異なると考えられるため、バルカーとして一括して扱うのではなく、できるだけ荷種毎に計算を行うことが適切である。一方で、統計上はどのバルカーが何を輸送したかは明確でなく、上記荷種全てを細分して計算することは困難である。そこで、現状で利用可能なデータ、パラメータを整理した結果、鉄鉱石輸送、石炭輸送、その他のバルクカーゴ輸送に区分して計算することが適切であると考えられた。以下の記述においては、バルカー全体として整理すべきものはそれとした上で、上記3区分での燃料消費量の算出過程を概説する。

#### (1) 鉄鉱石及び石炭、その他のバルクカーゴ輸送に従事する隻数

上述のように、鉄鉱石、石炭輸送、その他のバルクカーゴ輸送にそれぞれ関わるバルカーの比率を示す詳細な資料はないが、20万DWT以上のバルカーは全て、日本船舶明細書においては鉄鉱石運搬船と分類・記載されていることから、世界中のこのクラスのバルカーは全て鉄鉱石運搬船であると仮定した。20万DWT未満の船では、輸送総量( $TR_{ijk}$ )、積荷率( $\rho_{ijk}$ )を考慮し、全バルカーの内、鉄鉱石輸送に従事するものを36%、石炭の輸送に従事する船を50%、その他のバルクカーゴ輸送に従事する船を14%とした。

表 1.3-18 鉄鉱石輸送に従事するバルカーの船型・船齢構成( $S_{jk}$ )

単位:隻

DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10 -25	220	90	55	23	60	447
25 -50	288	151	237	63	201	941
50 -80	75	76	55	46	114	366
80 -100	5	4	1	2	4	15
100 -120	7	3	0	-	1	11
120 -200	35	57	70	93	156	411
200 -320	1	6	12	16	5	40
320 +	-	-	1	1	2	4
TOTAL	631	386	432	244	542	2,235

表 1.2-6より作成。「0」は計算上、0.5未満のものを示す。  
「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

表 1.3-19 石炭輸送に従事するバルカーの船型・船齢構成( $S_{jk}$ )

単位:隻

DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10 -25	304	124	77	31	83	619
25 -50	399	209	328	88	279	1,303
50 -80	104	105	77	64	158	507
80 -100	7	5	2	3	5	21
100 -120	9	5	1	-	1	15
120 -200	17	28	35	46	78	204
TOTAL	841	476	519	232	603	2,669

表 1.2-6より作成。  
「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

表 1.3-20 その他のバルクカーゴ輸送に従事するバルカーの船型・船齢構成( $S_{jk}$ )

単位:隻

DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10 -25	88	36	22	9	24	179
25 -50	116	60	95	25	81	377
50 -80	30	30	22	19	46	147
80 -100	2	1	1	1	1	6
100 -120	3	1	0	-	0	4
120 -200	5	8	10	13	22	59
TOTAL	243	138	150	67	174	772

表 1.2-6より作成。「0」は計算上、0.5未満のものを示す。  
「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

(2) 鉄鉱石の輸送による年間燃料消費量

載荷可能量

タンカーと同じく、Fearnleys World Bulk Fleet 1999には、バルカーの船型・船齢カテゴリ別DWT合計値が示されているので、同じ資料に掲載されているバルカーの隻数で除して、船型・船齢別の平均載荷可能量を求めた(表 1.3-21)。

表 1.3-21 鉄鉱石輸送に関わる船の平均載荷可能量( $K_{jk}$ )

単位:トン/隻

DWT( $10^3$ トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	18,301	19,600	20,130	19,048	19,880
25	-50	32,254	34,524	36,818	38,636	39,394
50	-80	62,679	64,455	64,935	68,217	70,347
80	-100	85,714	90,000	75,000	100,000	90,000
100	-120	116,667	111,111	100,000	-	100,000
120	-200	140,000	143,860	167,143	151,613	159,615
200	-320	300,000	216,667	225,000	218,750	220,000
320	+	-	-	400,000	320,000	320,000

Fearnleys World Bulk Fleet, January 1999より作成。

「-」はそのカテゴリの船が存在しないことを示す。

積荷率

バルカーの運航においても、タンカーの場合と同じく、バラスト水や輸送のための燃料など荷物以外の積載も必要である。ここでは、オペレーターからの聞き取り等により、正味の載荷可能量を8割と仮定することとした。

バルカーのうち、鉄鉱石輸送に関わる船舶は概して専用船として一定の航路に従事していることが多く、タンカー同様に年間航行日数の半分はバラスト航海であると考えられる。ただし、タンカーと比べてバルカーな鉄鉱石を運ぶことから、 $_{jk}$ は $0.5 \times 0.8$ より小さくなると考えられる。

いずれにしても、バルカーの積荷率( $_{jk}$ )については情報が不足しているため、上記の大まかな積荷率( $_{jk}$ )の傾向を考慮しつつ、それぞれの区分ごとには船型・船齢に係わらず一定と仮定し、計算上の年間輸送総量が表 1.2-1に示された統計上の年間輸送総量に合うよう調整するパラメータとして扱うことにした。

平均運航速度

日本船舶明細書に示されたバルカー各船舶の航海速度をみると、船型や建造年次(船齢)による明確な傾向は認められず、平均値は約15knt程度であった。そこで、明細書に示された航海速度の平均値をもって平均運航速度( $v_{jk}$ )とすることとし、一律15kntを採用することとした。なお、タンカーの場合と異なりバルカーでは速度の経年劣化分を主機の負荷を上げることで補っており、見かけ上速度の経年劣化は生じないこととした。この効果を含み、燃料消費率( $C_{jk}$ )を10年につき5%、船舶明細書に記載の数値から劣化させている(表 1.2-9参照)。

### 1日あたり最大輸送可能量

以上のデータより、まず鉄鉱石輸送に関わるバルカーの船型・船齢別の1日あたり輸送可能量( $A_{jk}$ )を算出する。最大輸送可能量( $A_{jk}$ )は次の式で求められる。鉄鉱石輸送に関わるバルカーの最大輸送可能量を表 1.3-22に示した。これらを用いて、以下に鉄鉱石輸送に関する年間輸送量並びに燃料消費量を算出する。

$$A_{jk} = K_{jk} \times v_{jk} \times S_{jk}$$

$A_{jk}$  :1日あたりの最大輸送可能量(トンマイル/日)

$K_{jk}$  :カテゴリ-j, kの載荷可能量(トン/隻) (表 1.3-21)

$v_{jk}$  :カテゴリ-j, kの速度(マイル/日) (より一律15knt×24と仮定)

$S_{jk}$  :カテゴリ-j, kの隻数 (表 1.3-18)

表 1.3-22 鉄鉱石輸送に関わるバルカーの1日あたりの最大輸送可能量( $A_{jk}$ )

単位:10<sup>6</sup>トンマイル/日

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	1,448	633	401	155	427	3,064
25	-50	3,348	1,874	3,141	879	2,857	12,099
50	-80	1,693	1,758	1,293	1,137	2,882	8,763
80	-100	155	116	39	65	116	491
100	-120	271	129	13	-	26	439
120	-200	633	1,060	1,512	1,823	3,219	8,247
200	-320	108	468	972	1,260	396	3,204
320	+	-	-	144	115	230	489
TOTAL		7,656	6,038	7,515	5,434	10,153	36,796

「-」はそのカテゴリの船が存在しないことを示す。

### 年間輸送総量の推定

鉄鉱石の年間輸送総量( $TR_{鉄鉱石}$ )は表 1.2-1に示した $2,520 \times 10^9$ トンマイル/年であるが、タンカーのように船型・船齢別の輸送総量( $TR_{jk}$ )の資料が入手できないため、これを船型・船齢別に分解する必要がある。ここで、輸送総量( $TR_{鉄鉱石}$ )を船型・船齢別に分解する手順を概説する。

基本式に立ち返ると、

$$TR_{jk} = K_{jk} \times \alpha_{jk} \times X_{jk} \times v_{jk} \times S_{jk}$$

である。ここで、船型・船齢別載荷可能量( $K_{jk}$ )、平均運航速度( $v_{jk}$  ; 一律360マイル/日=15knt×24h/日)、船型・船齢別隻数( $S_{jk}$ 、表 1.3-18)であるから、その積はまさに表 1.3-22にあたる。すなわち、

$$TR_{jk} = A_{jk} \times \hat{X} \times \hat{\alpha}$$

である。ここで、積荷率( $\alpha_{jk}$ )は船型・船齢には係わらず一定( $\hat{\alpha}$ とする)、航海日数( $X_{jk}$ )も船型・船齢に係わらず一定( $\hat{X}$ とする)と仮定すると、上記基本式は次のように変形される。

$$\begin{aligned}
TR_{\text{鉄鉱石}} &= \sum_j \sum_k TR_{jk} \\
&= \sum_j \sum_k (A_{jk} \times \hat{\alpha} \times \hat{X}) \\
&= \hat{\alpha} \times \hat{X} \times \sum_j \sum_k A_{jk} \\
\therefore \hat{\alpha} \times \hat{X} &= \frac{TR_{\text{鉄鉱石}}}{\sum_j \sum_k A_{jk}}
\end{aligned}$$

この一連の過程は、鉄鉱石輸送に関わらず、石炭輸送もその他のバルクカーゴ輸送も共通である。

さて、鉄鉱石輸送においては、20万DWT以上のクラスは鉄鉱石専用船であると仮定した。従って先ず、鉄鉱石の年間輸送量のうち、このクラスが輸送する量を決める。先に述べたように、積荷率( $\hat{\alpha}$ )は0.5×0.8より小さいと考えられることから、ここでは $\hat{\alpha}=0.4 \times 0.8$ と仮定する。年間の稼働日数は積み下ろしや定期的なドック入り等を考慮して、年間210日と仮定した。表 1.3-22の20万DWT以上クラスの最大輸送可能量( $A_{jk}$ )合計×210×0.4×0.8で20万以上のクラスの年間輸送総量( $TR$ )が求まる。この結果、20万DWT以上のクラスは $248 \times 10^9$ トンマイルを輸送することになる。従って、20万DWT未満クラスのバルカーでは表 1.2-1の $2,520 \times 10^9$ トンマイルから $248 \times 10^9$ トンマイルを差し引いた $2,272 \times 10^9$ トンマイルを輸送することとなる。表 1.3-22において、20万DWT未満の1日あたり最大輸送可能量の合計値は $33 \times 10^9$ トンマイルとなることから、上述の $\hat{\alpha} \times \hat{X}$ を求めると、

$$\hat{\alpha} \times \hat{X} = TR_{jk}(2,272 \times 10^9 \text{トンマイル}) \div A_{jk}(33 \times 10^9 \text{トンマイル}) = 68.9$$

となる。ここで20万DWT以上のクラスを含む各カテゴリーの鉄鉱石輸送量は最大輸送可能量( $A_{jk}$ 、表 1.3-22)に $\hat{\alpha} \times \hat{X}$ (68.9)を乗じた値により表 1.3-23のとおりとなる。

表 1.3-23 鉄鉱石の船型・船齢別年間輸送総量( $TR_{jk}$ )の推定値

単位:  $10^9$ トンマイル/年

DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10	-25	99	44	28	11	29
25	-50	230	129	216	60	196
50	-80	116	121	89	78	198
80	-100	11	8	3	4	8
100	-120	19	9	1	-	2
120	-200	44	73	104	125	221
200	-320	7	31	65	84	26
320	+	-	-	10	8	15
TOTAL		526	414	514	370	696

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

#### 年間航海日数の推定

積荷率( $\hat{\alpha}$ )と航海日数( $\hat{X}$ )の組み合わせは、 $\hat{\alpha} \times \hat{X} = 68.9$ より表 1.3-24のとおりであり、ここでは、積荷率( $\hat{\alpha}$ )や航海日数( $\hat{X}$ )が極端に少なくなったり多くなったりしない範囲

で、専門家などからの聞き取り結果等も踏まえて、積荷率( $\hat{\alpha}_{jk}$ )を $0.4 \times 0.8$ 、年間航海日数( $\hat{X}$ )を214日とした。以上の結果、鉄鉱石輸送に関わる日数は20万DWT以上のクラスの専用船で210日、20万DWT未満クラスの鉄鉱石船で214日とすることとした。

表 1.3-24 鉄鉱石輸送に関わるバルカー(20万DWT未満)の積荷率( $\hat{\alpha}$ )と年間航海日数( $\hat{X}$ )の関係

積荷率( $0 < \hat{\alpha} < 1$ )	0.08	0.16	0.24	0.32	0.4	0.48	0.56	0.64	0.72
航海日数( $0 < \hat{X} < 365$ )	-	-	287	214	172	143	123	107	95

「-」は $\hat{X}$ が365日を超える場合を示す。

#### 年間燃料消費量の推定

以上で求めた年間航海日数( $X_{jk}$ )と、表 1.2-9に示した鉄鉱石運搬船の燃料消費率( $C_{jk}$ )、及び表 1.3-18に示した鉄鉱石輸送に従事するバルカーの隻数( $S_{jk}$ )を乗ずることにより、鉄鉱石輸送に係る各船型・船齢ごとの年間の燃料消費量( $P_{jk}$ )を求めることができる。計算結果は表 1.3-25に示すとおりであり、世界中で年間 $15,700 \times 10^3$ t-Fuelの燃料が鉄鉱石輸送に使われていると推定された。

表 1.3-25 鉄鉱石輸送に関わる年間燃料消費量推定値( $P_{jk}$ )

単位:  $10^3$ t-Fuel/年

DWT( $10^3$ トン)		-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10	-25	1,032	475	257	100	290	2,155
25	-50	1,991	906	1,062	268	942	5,169
50	-80	684	543	312	247	671	2,457
80	-100	54	33	9	11	25	132
100	-120	81	32	3	-	7	124
120	-200	653	926	853	975	1,802	5,209
200	-320	17	88	127	169	53	455
320	+	-	-	11	11	21	42
TOTAL		4,512	3,004	2,634	1,781	3,811	15,743

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

### (3) 石炭の輸送による年間燃料消費量

#### 載荷可能量

(2)の の鉄鉱石輸送の場合と同様に求めた。

表 1.3-26 石炭輸送に関わる船の平均載荷可能量( $K_{jk}$ )

単位: トン/隻

DWT( $10^3$ トン)		-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98
10	-25	18,301	19,600	20,130	19,048	19,880
25	-50	32,254	34,524	36,818	38,636	39,394
50	-80	62,679	64,455	64,935	68,217	70,347
80	-100	85,714	90,000	75,000	100,000	90,000
100	-120	116,667	111,111	100,000	-	100,000
120	-200	140,000	143,860	167,143	151,613	159,615

Fearnleys World Bulk Fleet, January 1999より作成。

「-」はそのカテゴリーの船が存在しないことを示す。

## 積荷率

まず、(2)の の鉄鉱石輸送に関わるバルカーと同様、正味の載荷可能量を8割と仮定することとした。

バルカーのうち、鉄鉱石輸送及び石炭輸送に関わる船舶は概して専用船として一定の航路に従事していることが多く、タンカー同様に年間航行日数の半分はバラスト航海であると考えられる。また、鉄鉱石よりも、容積の割に重量の軽い石炭(間隙率も大きい)では、 $jk$ は鉄鉱石輸送よりもさらに小さくなると予想される。

いずれにしても、バルカーの積荷率( $jk$ )については情報が不足しているため、上記の大まかな積荷率( $jk$ )の傾向を考慮しつつ、船型・船齢に係わらず一定と仮定し、計算上の年間輸送総量が表 1.2-1に示された鉄鉱石、石炭、その他のバルクカーゴの年間輸送総量に合うよう調整するパラメータとして扱うことにした。

## 平均運航速度

(2)の の鉄鉱石輸送の場合と同様に、船型・船齢に関わりなく一律15kntとした。

## 1日あたり最大輸送可能量

(2)の の鉄鉱石輸送の場合と同様に、次に示す式で最大輸送可能量( $A_{jk}$ )を求めた(表 1.3-27)。計算に用いた値、表等は、下記に併せて示した。

$$A_{jk} = K_{jk} \times v_{jk} \times S_{jk}$$

$A_{jk}$  :1日あたりの最大輸送可能量(トンマイル/日)

$K_{jk}$  :カテゴリー-j, kの載荷可能量(トン/隻) (表 1.3-26)

$v_{jk}$  :カテゴリー-j, kの速度(マイル/日) (より一律15knt×24を仮定)

$S_{jk}$  :カテゴリー-j, kの隻数 (表 1.3-19)

表 1.3-27 石炭輸送に関わるバルカーの1日あたりの最大輸送可能量( $A_{jk}$ )

単位:10<sup>6</sup>トンマイル/日

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	2,004	877	555	215	591	4,242
25	-50	4,635	2,595	4,349	1,217	3,955	16,751
50	-80	2,344	2,434	1,790	1,575	3,991	12,134
80	-100	215	161	54	89	161	680
100	-120	376	179	18	-	36	609
120	-200	877	1,467	2,094	2,523	4,456	11,417
TOTAL		10,451	7,713	8,860	5,619	13,190	45,833

「-」はそのカテゴリーの船が存在しないことを示す。

## 年間輸送総量の推定

石炭の年間輸送総量は表 1.2-1に示した2,359×10<sup>9</sup>トンマイル/年であり、これを船型・船齢別に分解する必要がある。20万DWT以上のクラスのバルカーはすべて鉄鉱石運搬船としているので、石炭輸送は20万DWT未満クラスのみで行われる。計算方法は鉄鉱石輸

送で示したものと同じである。

20万DWT未満の1日あたり最大輸送可能量の合計値は、表 1.3-27によれば $46 \times 10^9$ トンマイルである。従って、

$$\hat{\alpha} \times \hat{X} = \frac{TR_{\text{石炭}}}{\sum \sum A_{jk}}$$

$$=(2,359 \times 10^9 \text{トンマイル}) \div (46 \times 10^9 \text{トンマイル})$$

$$=51.3$$

であり、各カテゴリーの石炭輸送量は $A_{jk}$ (表 1.3-27)に $\hat{\alpha} \times \hat{X}$ (51.3)を乗じた値となり、表 1.3-28のとおりとなる。

表 1.3-28 石炭の船型・船齢別年間輸送総量( $TR_{jk}$ )の推定値

単位:  $10^9$ トンマイル/年

DWT( $10^3$ トン)		-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10	-25	103	45	29	11	30	218
25	-50	239	134	224	63	204	862
50	-80	121	125	92	81	205	625
80	-100	11	8	3	5	8	35
100	-120	19	9	1	-	2	31
120	-200	45	76	108	130	229	588
TOTAL		538	397	456	289	679	2,359

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

#### 年間航海日数の推定

積荷率( $\hat{\alpha}$ )と航海日数( $\hat{X}$ )の組み合わせは、 $\hat{\alpha} \times \hat{X} = 51.3$ より、表 1.3-29の通りとなる。積荷率( $\hat{\alpha}$ )や航海日数( $\hat{X}$ )が極端に少なくなったり多くなったりしない範囲で、専門家などからの聞き取り結果等も踏まえて、積荷率( $\hat{\alpha}$ )を $0.3 \times 0.8$ 、年間航海日数( $\hat{X}$ )を214日とすることとした。

表 1.3-29 石炭輸送に関わるバルカーの積荷率( $\hat{\alpha}$ )と年間航海日数( $\hat{X}$ )の関係

積荷率( $0 < \hat{\alpha} < 1$ )	0.08	0.16	0.24	0.32	0.4	0.48	0.56	0.64	0.72
航海日数( $0 < \hat{X} < 365$ )	-	322	214	161	129	107	92	80	71

「-」は $\hat{X}$ が365日を超える場合を示す。

#### 年間燃料消費量の推定

以上述べたように、石炭輸送に関わる日数は214日であるから、これと表 1.2-9に示した石炭運搬船及びその他のバルカーの燃料消費率( $C_{jk}$ )、及び表 1.3-19に示した石炭輸送に従事するバルカーの隻数( $S_{jk}$ )を乗ずることにより、石炭輸送に係る年間の燃料消費量を算出した。計算結果は表 1.3-30に示すとおりであり、世界中で年間 $16,500 \times 10^3$ t-Fuelの燃料が石炭輸送に使われていると推定された。

表 1.3-30 石炭輸送に関わる年間燃料消費量( $P_{jk}$ )の推定値

単位:10<sup>3</sup>t-Fuel/年

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10	-25	1,429	658	356	138	402	2,984
25	-50	2,757	1,254	1,471	372	1,304	7,156
50	-80	947	751	432	342	929	3,402
80	-100	74	46	13	15	34	183
100	-120	112	44	5	-	10	171
120	-200	332	470	433	495	915	2,644
TOTAL		5,651	3,224	2,709	1,362	3,594	16,541

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

(4) その他のバルク輸送による年間燃料消費量

載荷可能量

(2)の に示した鉄鉱石輸送に関わる載荷可能量と同様の算定方法で求めた。

表 1.3-31 その他バルク輸送に関わる船の平均載荷可能量( $K_{jk}$ )

単位:トン/隻

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98
10	-25	18,301	19,600	20,130	19,048	19,880
25	-50	32,254	34,524	36,818	38,636	39,394
50	-80	62,679	64,455	64,935	68,217	70,347
80	-100	85,714	90,000	75,000	100,000	90,000
100	-120	116,667	111,111	100,000	-	100,000
120	-200	140,000	143,860	167,143	151,613	159,615

Fearnleys World Bulk Fleet, January 1999より作成。

「-」はそのカテゴリーの船が存在しないことを示す。

積荷率

まず、(2)の の鉄鉱石輸送に関わるバルカーと同様、正味の載荷可能量を8割と仮定することとした。

その他のバルカーでは不定期な航路に従事するケースが多く、鉄鉱石輸送及び石炭輸送に関わるバルカーよりは、年間航海日数( $X_{jk}$ )に占めるバラスト航海の割合は少ないと考えられる。しかし、穀物、ポーキサイト等、石炭ほどではないがバルキーな貨物を運んでいるため、 $_{jk}$ は $0.5 \times 0.8$ を若干超える程度になることが想定される。

いずれにしても、バルカーの積荷率( $_{jk}$ )については情報が不足しているため、上記の大まかな積荷率( $_{jk}$ )の傾向を考慮しつつ、それぞれの区分ごとには船型・船齢に係わらず一定と仮定し、計算上の年間輸送総量が表 1.2-1に示された年間輸送量に合うよう調整するパラメータとして扱うことにした。

平均運航速度

(2)の の鉄鉱石輸送の場合と同様に、船型・船齢に関わりなく一律15kntとした。

1日あたり最大輸送可能量

(2)の 鉄鉱石輸送の場合と同様に、次に示す式で最大輸送可能量( $A_{jk}$ )を求めた(表 1.3-32)。

$$A_{jk} = K_{jk} \times v_{jk} \times S_{jk}$$

$A_{jk}$  :1日あたりの最大輸送可能量(トンマイル/日)

$K_{jk}$  :カテゴリ-j, kの載荷可能量(トン/隻) (表 1.3-31)

$v_{jk}$  :カテゴリ-j, kの速度(マイル/日) (より一律15knt × 24を仮定)

$S_{jk}$  :カテゴリ-j, kの隻数 (表 1.3-20)

表 1.3-32 その他バルク輸送に関わるバルカーの1日あたりの最大輸送可能量( $A_{jk}$ )

単位:10<sup>6</sup>トンマイル/日

DWT(10 <sup>3</sup> トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	580	254	161	62	171	1,228
25	-50	1,341	751	1,258	352	1,144	4,846
50	-80	678	704	518	456	1,155	3,511
80	-100	62	47	16	26	47	198
100	-120	109	52	5	-	10	176
120	-200	254	425	606	730	1,289	3,304
	TOTAL	3,024	2,233	2,564	1,626	3,816	13,263

「-」はそのカテゴリの船が存在しないことを示す。

これらを用いて、以下にその他バルク輸送に関する年間輸送量並びに燃料消費量を算出する。

年間輸送総量の推定

穀物、リン鉱石等、鉄鉱石及び石炭を除くその他のバルクカーゴの年間輸送総量( $TR_{jk}$ )は、表 1.2-1によれば合計1,365 × 10<sup>9</sup>トンマイル/年であり、石炭と同じく、これを20万 DWT未満クラスのバルカーが輸送する。計算手順は鉄鉱石、石炭輸送と全く同じである。

既に述べたように、20万DWT未満の1日あたり最大輸送可能量( $A_{jk}$ )の合計値は、表 1.3-32によれば13 × 10<sup>9</sup>トンマイルである。従って、

$$\hat{\alpha} \times \hat{X} = \frac{TR_{\text{バルク}}}{\sum \sum A_{jk}}$$

$$= (1,365 \times 10^9 \text{トンマイル}) \div (13 \times 10^9 \text{トンマイル})$$

$$= 102.6$$

であり、その他のバルク輸送の船型・船齢別年間輸送総量( $TR_{jk}$ )は $A_{jk}$ (表 1.3-22)に  $\hat{\alpha} \times \hat{X}$  (102.6)を乗じた値となり、表 1.3-33のとおりとなる。

表 1.3-33 その他のバルクの船型・船齢別年間輸送総量( $TR_{jk}$ )の推定値

単位:10<sup>9</sup>トンマイル/年

DWT(10 <sup>3</sup> トン)	-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10 -25	60	26	17	6	18	126
25 -50	138	77	130	36	118	499
50 -80	70	72	53	47	119	361
80 -100	6	5	2	3	5	20
100 -120	11	5	1	-	1	18
120 -200	26	44	62	75	133	340
TOTAL	311	230	264	167	393	1,365

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

#### 年間航行日数の推定

積荷率( $\hat{\alpha}$ )と航海日数( $\hat{X}$ )の組み合わせは、 $\hat{\alpha} \times \hat{X} = 102.6$ より、表 1.3-34のとおりであり、積荷率( $\hat{\alpha}$ )や航海日数( $\hat{X}$ )が極端に少なくなったり多くなったりしない範囲で、専門家などからの聞き取り結果等も踏まえて、積荷率( $\hat{\alpha}$ )を $0.6 \times 0.8$ 、年間航海日数( $\hat{X}$ )を214日とすることとした。

表 1.3-34 その他のバルク輸送に関わるバルカーの積荷率( $\hat{\alpha}$ )と年間航海日数( $\hat{X}$ )の関係

積荷率( $0 < \hat{\alpha} < 1$ )	0.08	0.16	0.24	0.32	0.4	0.48	0.56	0.64	0.72
航海日数( $0 < \hat{X} < 365$ )	-	-	-	322	257	214	184	161	143

「-」は $\hat{X}$ が365日を超える場合を示す。

#### 年間燃料消費量の推定

以上述べたように、その他のバルク輸送に関わる日数は214日であるから、これと表 1.2-9に示した石炭運搬船及びその他のバルカーの燃料消費率( $C_{jk}$ )、表 1.3-20に示したその他のバルクカーゴ輸送に従事するバルカーの隻数( $S_{jk}$ )を乗ずることにより、鉄鉱石及び石炭を除くバルク輸送に係る年間の燃料消費量を算出した。計算結果は表 1.3-35に示すとおりであり、世界中で年間 $4,800 \times 10^3$ t-Fuelの燃料が鉄鉱石、石炭以外のバルク輸送に使われていると推定された。

表 1.3-35 その他のバルク輸送に関わる年間燃料消費量( $P_{jk}$ )の推定値

単位:10<sup>3</sup>t-Fuel/年

DWT(10 <sup>3</sup> トン)	-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10 -25	413	190	103	40	116	863
25 -50	798	363	425	107	377	2,070
50 -80	274	217	125	99	269	984
80 -100	22	13	4	4	10	53
100 -120	32	13	1	-	3	50
120 -200	96	136	125	143	265	765
TOTAL	1,635	933	784	394	1,040	4,785

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

(5) バルカー全体での年間燃料消費量

年間燃料消費量( $P_{jk}$ )は、鉄鉱石輸送で $15,700 \times 10^3$ t-Fuel(表 1.3-25)、石炭輸送で $16,500 \times 10^3$ t-Fuel(表 1.3-30)、その他バルク輸送で $4,800 \times 10^3$ t-Fuel(表 1.3-35)、合計 $37,000 \times 10^3$ t-Fuel(表 1.3-36)となった。

ここで推定した210日程度の年間航海日数( $X_{jk}$ )はやや低めのように感じられる。燃料消費量は航海日数と単純な比例関係にあるので、航海日数( $X_{jk}$ )が倍になれば、必然的に燃料消費量も倍になる。バルカーの真の航海日数( $X_{jk}$ )は把握できていないものの、荷物の積み下ろし時間や定期的なドック時間等を考慮すると、バルカー全体での平均航海日数( $X_{jk}$ )は最大でも250日程度と考えられる、この場合であっても、燃料消費量は最大で約1.2倍(250/210)となるにすぎず、タンカー、コンテナを含めた外航船全体の燃料消費量に対してあまり大きな影響は与えないと思われる(+10%未満の差と考えられる)。

表 1.3-36 バルカーの年間燃料消費量( $P_{jk}$ )の推定値

単位:  $10^3$ t-Fuel/年

DWT( $10^3$ トン)		-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10	-25	2,874	1,324	717	278	808	6,002
25	-50	5,545	2,522	2,958	747	2,623	14,396
50	-80	1,905	1,511	869	689	1,870	6,843
80	-100	150	93	26	31	68	368
100	-120	225	89	10	-	20	344
120	-200	1,081	1,533	1,411	1,612	2,981	8,618
200	-320	17	88	127	169	53	455
320	+	-	-	11	11	21	42
TOTAL		11,797	7,161	6,128	3,538	8,444	37,069

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

### 1.3.3 コンテナ船

コンテナ船の燃料消費量を計算するために用いるデータを整理すると、表 1.3-37のとおりとなる。

コンテナ船については、後述するようにLloyd's Maritime Information Services(LMIS)から、船型・船齢別の航海日数( $X_{jk}$ )を直接集計した。従って、航海日数( $X_{jk}$ )、燃料消費率( $C_{jk}$ 、表 1.2-10)、及び隻数( $S_{jk}$ )の積により、燃料消費量を求めることが可能である。

表 1.3-37 モデル式中のパラメータの取り扱い( $i$ =コンテナ船)

パラメータ	パラメータの説明	モデルでの取り扱い
$C_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の燃料消費率(t-Fuel/日/隻)	日本船舶明細書からの <b>推定値</b>
$X_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の年間航海日数(日/年)	資料からの <b>推定値</b>
$TR_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の輸送量(トマール/年)	<b>計算結果</b>
$K_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の載荷可能量(TEU/隻)	日本船舶明細書からの <b>推定値</b>
$S_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の隻数	<b>統計値</b>
$\rho_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の積荷率	<b>計算結果</b>
$V_{jk}$	カテゴリ- $j,k$ の平均運航速度(マイル/日)	日本船舶明細書に基づく <b>仮定値</b> 。カテゴリ- $j,k$ の積荷航海時の平均運航速度(knt)をマイル/日に転換

#### (1) 船型・船齢別の載荷可能量

日本船舶明細書に記載の値を整理して求めた(表 1.3-38)。

表 1.3-38 コンテナ船の平均載荷可能量( $K_{jk}$ )

単位:TEU/隻

載荷可能量(TEU/隻)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
1000 未満	432	445	401	414	402
1000 以上 - 1999 以下	1,276	1,273	1,376	1,443	1,585
2000 以上 - 2999 以下	2,046	2,022	2,286	2,535	2,503
3000 以上 - 3999 以下	3,373	3,307	3,253	3,383	3,436
4000 以上 - 4499 以下	-	-	4,128	4,204	4,229
4500 以上	-	-	5,694	5,693	5,881

「-」はそのカテゴリーの船が存在しないことを示す。

#### (2) 平均運航速度

日本船舶明細書に示されたコンテナ船の巡航速度をみると、船型や建造年次(船齢)による明確な傾向は認められず、平均値は約21kntであった。そこで、日本船舶明細書に示された巡航速度の平均値をもって平均運航速度とすることとし、一律21kntを採用することとした。なお、コンテナ船では速度の経年劣化分を主機の負荷を上げることで補っており、見かけ上速度の経年劣化は生じないこととした。その分、この効果を含み、燃料消費率( $C_{jk}$ )を10年につき5%、日本船舶明細書に記載の数値から劣化させた(表 1.2-10参照)。

(3) 年間航海日数

コンテナ船では、Lloyd's Maritime Information Services(LMIS)から船型・船齢カテゴリー別に年間航海日数( $X_{jk}$ )の集計が可能である。集計結果を表 1.3-39に示した。

表 1.3-39 コンテナ船の年間航海日数( $X_{jk}$ )

単位:日/年					
載荷可能量(TEU/隻)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
1000 未満	249	252	254	252	249
1000 以上 - 1999 以下	254	257	261	257	260
2000 以上 - 2999 以下	258	271	273	272	262
3000 以上 - 3999 以下	294	260	274	278	274
4000 以上 - 4499 以下	-	271	259	273	269
4500 以上	-	271	259	273	263

「-」はそのカテゴリーの船が存在しないことを示す。  
Lloyd's Maritime Information Services(LMIS)より作成。

(4) 船型・船齢別の積荷率と年間輸送総量

コンテナ船については、(3)に示したように現状での航海日数( $X_{jk}$ )を直接得ることができたので、燃料消費量を計算するだけであれば、これと燃料消費率を掛け合わせて求めることができる。しかし将来予測をしていく上では、どのカテゴリーのコンテナ船がどのくらいの量を輸送しているのかを把握しておくことが必要となる。

コンテナ船全体での年間輸送総量( $TR_i$ )は、表 1.2-4に示した $3,520 \times 10^8$ TEUマイル/年がある。バルカーでの計算と同じく、基本式に立ち返ると、

$$TR_{jk} = K_{jk} \times \alpha_{jk} \times X_{jk} \times v_{jk} \times S_{jk}$$

であり、このうち船型・船齢別載荷可能量( $K_{jk}$ )、航海日数( $X_{jk}$ )、平均運航速度

( $v_{jk}$ ;一律504マイル/日=21knt×24h/日)、船型・船齢別隻数( $S_{jk}$ )を統計あるいは推定により決定した。ここで、積荷率( $\alpha_{jk}$ )は船型・船齢には係わらず一定( $\hat{\alpha}$ とする)と仮定すると、上記基本式は次のように変形される。

$$TR_{jk} = (K_{jk} \times v_{jk} \times S_{jk}) \times \hat{\alpha} \times X_{jk}$$

$$= A_{jk} \times \hat{\alpha} \times X_{jk}$$

$$\therefore TR = \sum_j \sum_k TR_{jk}$$

$$= \sum_j \sum_k (A_{jk} \times \hat{\alpha} \times X_{jk})$$

$$= \hat{\alpha} \times \sum_j \sum_k (A_{jk} \times X_{jk})$$

$$\therefore \hat{\alpha} = \frac{TR}{\sum_j \sum_k A_{jk} \times X_{jk}}$$

$TR$ と $A_{jk}$ 及び $X_{jk}$ は既知であるから、積荷率( $\hat{\alpha}$ )は唯一解として求められる。 $\hat{\alpha}$ が決まってしまうと、 $TR_{jk}$ が決定できることは上式の展開から当然である。

実際に式を解くと、 $\hat{\alpha}=0.67$ となる。

このように求めた船型・船齢別年間輸送総量を表 1.3-40に示した。これによれば、船型別には、4,000TEU未満のコンテナ船が全輸送総量のうち80%を占め、船齢別には、1984年以降建造された船が70%を占めている。

表 1.3-40 コンテナ船の船型・船齢別年間輸送総量( $TR_{jk}$ )の推定値

単位:10<sup>6</sup> TEUマイル/年

可能搭載量(TEU/隻)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
1000 未満	21,164	13,309	9,157	9,189	8,469	61,288
1000 以上 - 1999 以下	21,529	16,888	14,774	14,371	28,138	95,701
2000 以上 - 2999 以下	5,160	10,359	12,009	12,347	37,845	77,720
3000 以上 - 3999 以下	1,674	8,418	8,736	11,726	24,801	55,355
4000 以上 - 4499 以下	-	-	5,452	11,616	15,724	32,791
4500 以上	-	-	5,515	16,778	6,779	29,072
TOTAL	49,527	48,974	55,642	76,027	121,757	351,927

「-」はその船型のコンテナが存在しないことを示す。

(5) 年間燃料消費量

以上の結果、コンテナ船の燃料消費率(表 1.2-10)と年間航海日数(表 1.3-39)及び隻数(表 1.2-7)の積として、船型・船齢別燃料消費量を得た(表 1.3-41)。

表 1.3-41 コンテナ船の年間燃料消費量( $P_{jk}$ )推定値

単位:10<sup>3</sup>t-Fuel/年

可能搭載量(TEU/隻)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
1000 未満	8,708	4,873	3,585	2,630	2,496	22,291
1000 以上 - 1999 以下	2,999	2,161	1,686	1,180	2,104	10,130
2000 以上 - 2999 以下	553	1,032	1,027	765	2,419	5,795
3000 以上 - 3999 以下	128	611	628	678	1,433	3,477
4000 以上 - 4499 以下	-	-	356	647	892	1,895
4500 以上	-	-	298	803	321	1,423
TOTAL	12,387	8,677	7,581	6,702	9,664	45,011

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

## 1.4 船種別の燃料消費量とCO<sub>2</sub>排出量

### 1.4.1 船種別燃料消費量のつみ上げとCO<sub>2</sub>排出量への換算

1.3までに示した船種別燃料消費量( $P_i$ )をまとめると表 1.4-1のとおりとなる。

消費されたバンカーオイルを全量MFOまたはC重油相当と仮定すると、CO<sub>2</sub>排出係数(EFCO<sub>2</sub>)は、2,999g-CO<sub>2</sub>/kg-Fuel<sup>3</sup>であるので、ここで計算された外航船舶からのCO<sub>2</sub>排出量は約320 × 10<sup>6</sup>トン/年、タンカー、バルカー、コンテナ船からのCO<sub>2</sub>排出量はそれぞれ105 × 10<sup>6</sup>トン/年、111 × 10<sup>6</sup>トン/年、135 × 10<sup>6</sup>トン/年となる(表 1.4-1)。

表 1.4-1 計算により推定された船種別の燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量

区分		年間輸送総量 (10 <sup>9</sup> トンマイル)	燃料消費量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	CO <sub>2</sub> 排出量 (10 <sup>6</sup> t-CO <sub>2</sub> /年)
タンカー	原油	9,321	26	78
	石油製品	2,289	9	28
	計	11,610	35	105
バルカー	鉄鉱石運搬船	2,520	16	47
	石炭運搬船	2,359	17	50
	その他	1,365	5	14
	計	6,245	37	111
コンテナ船		352 × 10 <sup>9</sup> TEUマイル	45	135

燃料消費量からCO<sub>2</sub>排出量への換算には、CO<sub>2</sub>排出係数2,999g-CO<sub>2</sub>/kg-Fuelを用いた。四捨五入のため端数が一致しない場合がある。

### 1.4.2 バンカーオイル払い出し量からのCO<sub>2</sub>排出量の推定

外航船舶からの年間CO<sub>2</sub>排出総量は、バンカーオイルの総払い出し量から推定できる。表 1.4-2はOECDが作成している統計資料から得たバンカーオイルの総払い出し量である。

ここで、表 1.4-2に示した1997年のGas/Diesel Oil払い出し量に、前出の排出係数2,999g-CO<sub>2</sub>/kg-Fuelを乗じると、CO<sub>2</sub>排出量は373 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年と推定された。また、参考として1995年のバンカーオイル払い出し量、CO<sub>2</sub>排出量も併せて示した。

前項で示したタンカー、バルカー、コンテナ船の燃料消費量合計値及びCO<sub>2</sub>排出量と、ここで示した統計を比較すると、船種別に積上げた数値は払い出し統計値の94%を説明できると考えられた(表 1.4-3)。それぞれの船種とも、計算に必要なパラメータの精度や計算上の仮定から考えて、燃料消費量にはある程度の誤差を持っている可能性があるが、ここではバンカーオイル消費量と積上げ値の差を「その他(不明分)」として処理することとする。

<sup>3</sup> 日本政府(1994)、「気候変動に関する国際連合枠組条約」に基づく日本国報告書。Gas/Diesel OilはMDOもしくはA重油・軽油に相当する。Heavy Fuel OilはMFOもしくはC重油に相当する。

表 1.4-2 バンカーオイルの払い出し量(OECD+非OECD諸国の合計値)

単位:10<sup>6</sup>t

年		Gas/Diesel Oil	Heavy Fuel Oil	計
1995	バンカーオイル	28.6	102.4	131.6
	CO <sub>2</sub> 排出量	85.8	307.1	394.7
1997	バンカーオイル	26.8	97.5	124.4
	CO <sub>2</sub> 排出量	80.4	292.4	373.1

Energy Statistics of OECD Countries 1995-1996 (OECD/IEA)、Energy Statistics and Balances of Non-OECD Countries 1995-1996(OECD/IEA)及びEnergy Statistics of Non-OECD Countries 1997-1998 (OECD/IEA)より作成。

燃料消費量からCO<sub>2</sub>排出量への換算には、CO<sub>2</sub>排出係数2,999g-CO<sub>2</sub>/kg-Fuelを用いた。四捨五入のため端数が一致しない場合がある。

表 1.4-3 船種別の燃料消費量と割合

区分	燃料消費量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	CO <sub>2</sub> 排出量 (10 <sup>6</sup> t-CO <sub>2</sub> /年)	比率(%)
タンカー	35	105	28
バルカー	37	111	30
コンテナ船	45	135	36
その他	7	22	6
計	124	373	100

燃料消費量からCO<sub>2</sub>排出量への換算には、CO<sub>2</sub>排出係数2,999g-CO<sub>2</sub>/kg-Fuelを用いた。四捨五入のため端数が一致しない場合がある。

#### 1.4.3 外航船舶によるCO<sub>2</sub>排出量の寄与割合

ここでは、外航船舶からのCO<sub>2</sub>排出量が世界全体でのCO<sub>2</sub>排出量に占める割合を検討する。なお、比較資料等の都合上、ここではすべて1995年ベースのCO<sub>2</sub>排出量で検討した。

表 1.4-4には1995年時点での船舶区分別CO<sub>2</sub>排出量を示した。これは、平成10年度にシップ・アンド・オーシャン財団<sup>4</sup>が行った調査結果によるものである。これによると、外航船舶からのCO<sub>2</sub>排出量は内航船舶や漁船等を含む全船舶からの排出量の約70%を占めていた。

表 1.4-4 船舶からのCO<sub>2</sub>排出量(1995)

単位:10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>

	Gas/Diesel oil	Heavy Fuel Oil	Motor Gasoline	排出量合計	排出量割合
内航輸送	48.1	25.8	17.2	91.1	16%
漁業	35.0	0.3	4.5	39.7	7%
レジャー	-	-	28.7	28.7	5%
外航船舶 (マリンバンカー)	87.8	307.1	-	394.7	71%
計	170.9	333.2	50.3	554.2	100%

シップ・アンド・オーシャン財団(1999)「平成10年度 船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査報告書」より作成。マリンバンカーの消費量の値を、最新のOECD+非OECD諸国の合計値(表 1.4-2と同じ値)に修正しCO<sub>2</sub>排出量を求めた。

表中外航船舶の値が、表 1.4-2の合計値と対応する。

<sup>4</sup> シップ・アンド・オーシャン財団(1999)「平成10年度 船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査報告書」

なお表 1.4-4中の数値は、統計資料に示された燃料消費量から換算して得たもの(外航船舶)だけでなく、一部の国の燃料消費量や運航実績等から世界全体に外挿したものが含まれている。例えば、世界の内航輸送はOECD諸国の燃料消費量を世界全体に外挿することで得たものである。また、漁業やレジャーによる消費量は、使用実態等から推定した日本国内における燃料消費量を、隻数などによって世界全体の消費量として外挿したものである。ちなみに、内航輸送、漁業、レジャーからの排出量はUNFCCCにおいては各国政府が自国発生分に含めて削減対象とするものである。

表 1.4-5に、全世界、船舶、主要国のCO<sub>2</sub>排出量比較<sup>5</sup>を示した。全世界での排出量はオークリッジ研究所の検討値であり、外航船舶からのCO<sub>2</sub>排出量も含んでいる。オークリッジ研究所の検討値を基準とすると、船舶由来の排出量は世界全体の2.4%、外航船舶は1.7%程度を占めるものと推定される。これを各国別の排出量と比較すると、船舶全体のCO<sub>2</sub>排出量はカナダ一、外航船舶からのそれはフランス一からのCO<sub>2</sub>排出量にほぼ相当するものであり、外航船舶からの排出量も決して少なくないことが理解されよう。

表 1.4-5 世界におけるCO<sub>2</sub>排出量の比較(1995年)

区分	CO <sub>2</sub> 排出量 (10 <sup>6</sup> トン)	全世界に占める割合(%)	
全世界	23,503	-	
船舶由来の排出量 (漁業、レジャー、内航海運を含む)	554.2	2.4	
上記のうち外航船舶	394.7	1.7	
主要国の CO <sub>2</sub> 排出量	米国	5,214	22.2
	日本	1,218	5.2
	スウェーデン	585	2.5
	英国	581	2.5
	カナダ	499.7	2.1
	フランス	385	1.6

シップ・アンド・オーシャン財団(2000)「平成11年度船舶から発生するCO<sub>2</sub>の抑制に関する調査研究報告書」による。各国の数値はIPCC提供のもの。全地球の排出量は米国オークリッジ研究所二酸化炭素情報解析センターのもの。

<sup>5</sup> シップ・アンド・オーシャン財団(2000)「平成11年度船舶から発生するCO<sub>2</sub>の抑制に関する調査研究報告書」

## 2 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの排出量に関する調査

燃料消費より排出されるCO<sub>2</sub>以外にも、外航船舶の運航に伴って他の温室効果ガスが排出されている。京都議定書では、CO<sub>2</sub>を含めて表 2.1-1に示す6物質が、削減対象の温室効果ガスとして指定されている。表中に陸上での主な発生源と外航船舶の運航に伴う主な発生経路について示した。このうち、大きな排出量が予測されるのは、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFCsの3物質である。PFCs(代替ハロン類)は消火剤として用いられるが、現在船用として貯蔵されているものは特定ハロンがほとんどであり、廃棄時以外の漏洩量も無視できることから、PFCsは対象外とした。SF<sub>6</sub>についても半導体の製造工程や絶縁体としての利用がほとんどであり、船用ではごく少量しか利用されていないことから対象外とした。そこで、以下に3物質それぞれの排出量を算定した。なお算定年度は入手可能な統計値などを考慮し、一律に1997年とした。

外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスについては、排出源の割り当ても明確になっていない。例えば、荷役作業時にふ頭上で発生する排出量を陸上側の排出量としてカウントするのか、船舶の運航に伴う排出量とするのか、あるいは輸送物品の輸出国の責任とするか輸入国の責任とするか、といったアロケイト(割り付け)問題があるが、本章においては外航船舶運航に伴う排出総量を、現状把握のためカウントすることとした。

表 2.1-1 CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの主な発生源

	陸上での主な発生源など	船舶運航からの主な発生経路
CO <sub>2</sub> (二酸化炭素)	燃料の燃焼	燃料の燃焼
CH <sub>4</sub> (メタン)	農業、ゴミ廃棄物の腐敗により自然発生する	燃料の未燃焼分、原油などの移動時に荷室より蒸発漏洩する
N <sub>2</sub> O(一酸化二窒素)	アジピン酸(ナイロン66の原料)の生成の副産物など化学工程	燃料の未燃焼分(窒素酸化物のごく一部分として排出される)
HFCs (ハイドロフルオロカーボン)	冷蔵設備よりの自然漏洩、工業過程での使用時に漏洩する。	冷凍船及び冷凍コンテナの冷媒が自然漏洩する。
PFCs (パラフルオロカーボン)	消火剤	-
SF <sub>6</sub> (六ふっ化イオウ)	高電圧回路などの絶縁ガス 半導体製造プロセス など	-

### 2.1 CH<sub>4</sub>の排出量の推定

CH<sub>4</sub>は質量当たりCO<sub>2</sub>の21倍の温暖化効果をもっており、相対的に少量でも大きな温暖化影響をもたらす可能性がある。

CH<sub>4</sub>は、農業や廃棄物埋立地からの放出が多いことが知られている。「気候変動に関する国際連合枠組条約」に基づく第二回の日本国報告書によれば、わが国における1998年のCH<sub>4</sub>の放出量はおよそ136万トンであるが、その80%以上は農業及び廃棄物埋め立てからの放出が占めている。燃料の未燃焼分等、エネルギー関連の排出は日本国内では13%程度であるが、国外では石油、石炭、天然ガスなど化石燃料の採掘プロセスあるいは陸上輸送プロセスに伴う排出も多い。

一方、外航船舶の運航に伴う排出では、船用機関からの燃料の未燃焼分としての排出及び原油輸送に伴う漏洩が考えられる。

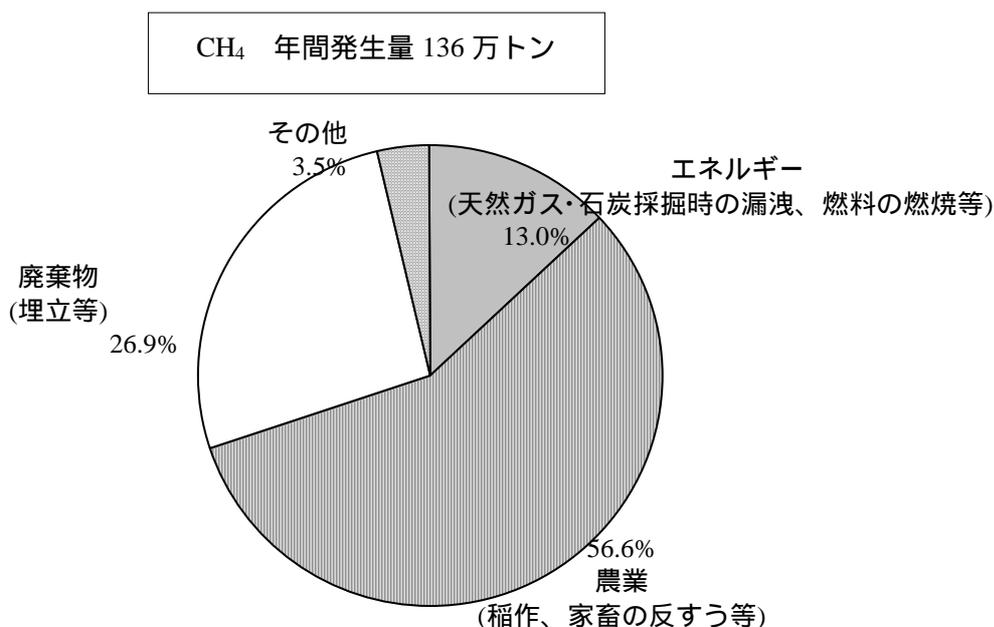


図 2.1-1 日本国における陸上からのCH<sub>4</sub>排出量(1998年度)

### 2.1.1 船用機関からの排出量

船用機関の排ガス中のCH<sub>4</sub>濃度及びNMVOC(non-methane volatile organic compounds; CH<sub>4</sub>以外の揮発性有機炭素ガスの総称)の測定例は世界的にみても例が少ないが、運輸省船舶技術研究所(現、独立行政法人 海上技術安全研究所)研究<sup>6</sup>があり、CH<sub>4</sub>濃度はおおよそ1,000 ~ 1,500ppbの間に分布している。この数値をIPCCの排出係数に換算すると、およそ0.3 ~ 0.5 kg/TJとなる。IPCCレポートにおける船用機関のCH<sub>4</sub>排出係数は、燃料種、機関の大きさに関わらず5 kg/TJと設定されており、これは自動車用ディーゼルと同じ設定である。一方、国際海事機関(IMO)の海洋環境保護委員会(MEPC)の第45回会合において提出されたコンサルレポート(MEPC 45/8)では、EMEP/CORINAIR, 1990年版<sup>7</sup>の排出係数データベースに基づき、7.5 kg/TJ(原表記0.3 kg/t-Fuel)の排出係数が用いられている。この値はIPCCレポートの車載用ガソリン機関と同じ数値である。

船舶技術研究所の報告値、あるいは陸上車用のエンジンと比較した船用機関の燃焼温度の高さ及び反応時間の長さ、等を考慮すると、IPCC及びMEPC45/8で使用している排出係数は過大評価である可能性が高いと考えられるが、ここではIPCCガイドラインに従い、MEPC 45/8(表 2.1-1参照)の排出係数(7.5kg/TJ)及び排出量( $0.037 \times 10^6$  t/年)を用いるものとする。

<sup>6</sup> 船舶技術研究所(2000)「平成12年度船舶技術研究所発表会講演集、船用ディーゼル機関から排出される揮発性有機化合物の計測及び評価」

<sup>7</sup> CORINAIR90 database, the CORINAIR 1994 default emission factors, the EDGARVersion 2.0 database, National Communications to the FCCC, Berdowski, et al. (1993a and 1993b), Radian Corporation (1990) and US EPA (1995).

表 2.1-1 機関排ガスからのCH<sub>4</sub>の排出量試算の比較

	排出係数 (kg/TJ)	CH <sub>4</sub> 放出量 (10 <sup>6</sup> トン/年)	CO <sub>2</sub> 換算放出量 (10 <sup>6</sup> トン/年)	船舶からのCO <sub>2</sub> 排出量に対する比率
MEPC 45/8	7.5	0.037	0.78	0.21%
IPCC 1996 edition	5	0.025	0.52	0.14%
船舶技術研究所の測定値*	0.3-0.5	0.001-0.002	0.03-0.05	0.01-0.01%

\*高速4サイクル機関2台と中速4サイクル機関及び低速2サイクル機関のおおの1台の実測

## 2.1.2 原油の輸送プロセスに伴うCH<sub>4</sub>の排出量

燃焼以外の船舶運航に伴うCH<sub>4</sub>の発生源としては、原油の輸送プロセスに伴う大気への放出が考えられる。原油輸送プロセスに伴うCH<sub>4</sub>の排出は、積荷航海時、バラスト航海時(空き荷航海時)、積み荷時、揚げ荷時の4つのフェーズに分解できる。2章の冒頭にも述べたように、荷役時に発生するCH<sub>4</sub>の排出量については、原油輸送プロセスに伴うCH<sub>4</sub>の排出とするのか、議論の分かれるところである。特に荷積み時については、荷役の動力源も陸上側に頼っており、陸上側(=原油供給施設側)の排出として把握するという考え方もある。しかし、陸上の温室効果ガス排出量算定のために作成されたIPCCガイドラインにおいては、原油供給時のCH<sub>4</sub>排出量についての記載が小さく、このため国内の原油供給施設における原油荷積み時のCH<sub>4</sub>排出についても、日本国からのUNFCCC提出の報告書にカウントされていないのが現状である。

これらを鑑みて、従来カウントされていない排出分の実態を把握するために、原油輸送プロセスより発生するCH<sub>4</sub>排出について、検討を試みた。

### (1) 積荷航海時のCH<sub>4</sub>排出の状況

積荷航海時には、タンクの上部空間(一般にフル充填で荷室体積の5%程度)はイナートガスと呼ばれる低酸素ガスが加圧充填されており、その圧力は大気圧+約300mmHg以上とされている。イナートガスは、A重油などの比較的良質な燃料を専用ボイラーで燃焼し、その排ガスをスクラバーなどにより洗浄冷却したもので、生成直後のイナートガスにはCH<sub>4</sub>や炭化水素類はほとんど存在しない。

しかし、積み荷作業時あるいは航行中に原油液面より原油ガスが蒸散し、イナートガス中に原油ガスが徐々に拡散混合する。この際の蒸発速度係数  $A(m^3/m^2 \cdot h^{1/2})$  は、気温、原油の種類などにより影響されるが、おおよそ図 2.1-2に示すとおりで、各温度軸に対しては、2~2.5倍程度の差異しかなく、飽和蒸気に達するまでの到達時間に差があるものの、半日程度経過すれば最終到達濃度(=飽和蒸気圧濃度)になると予想される。また、このときの同一圧力下におけるCH<sub>4</sub>等の原油ガス濃度(飽和濃度)は、原油中のCH<sub>4</sub>等のガスの組成比に応じた濃度になるものと考えられる。

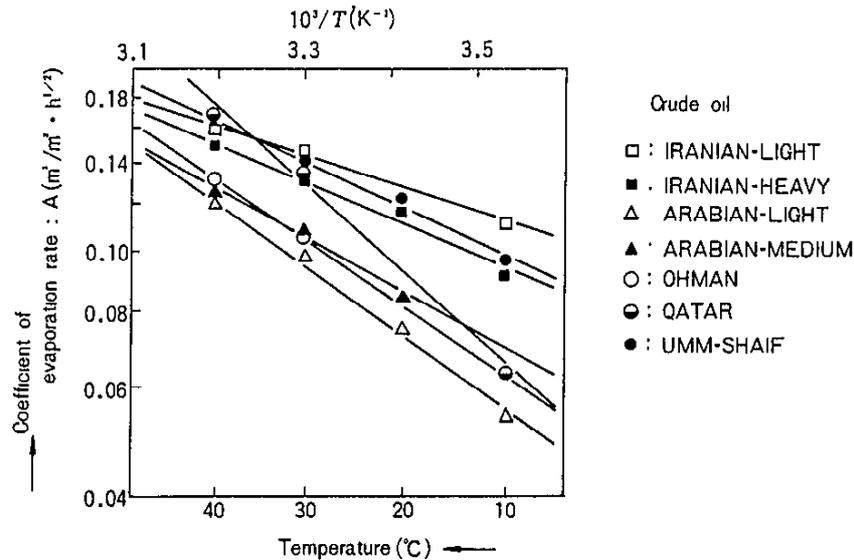


図 2.1-2 原油種ごとの800 mmHgにおける蒸発速度係数の違い<sup>8</sup>

荷室には原油ガス排出弁とイナートガス吸引弁が設置されており、荷室内の圧力上昇により排出弁が開き、気温の低下などの要因で圧力が低下した場合には新たなイナートガスが荷室内に導入される。ただし、最近のタンカーにおいては、排出弁は 1,300 mmHg 程度で開く設定になっており、通常的气象条件下では大きな吸排気起ることは稀と予測される。積荷航海時の原油ガスの排出量は、API(1981)の報告<sup>9</sup>によれば 1 週間あたりにガス体積として積荷量の 5%程度と推定されており、本報告書でもその数字を使用するものとする。なお API の報告書は、IPCC ガイドラインにおいて原油移動時の CH<sub>4</sub> 排出量推定方法の原典となっている。

なお、原油ガス中には化学構造(C 数等)の異なる数種のガスが存在するが、その比率は原油の種類に左右される。測定例を表 2.1-2に示したが、プロパン(表中 C3)とブタン(表中 C4)の占める割合が大きい。また、CH<sub>4</sub>(表中 C1)に注目すると、原油ガス中の濃度は 2.0 ~ 12vol% の範囲にある。

本報告書では 4 つのフェーズ(積荷航海時、バラスト航海時、積み荷時、揚げ荷時)ごとの CH<sub>4</sub> 排出量を計算しているが、その場合はまず産地ごとに蒸発速度係数に従ってトータルの原油ガスを算出し、さらに全原油ガス中の CH<sub>4</sub> 濃度を、表 2.1-2に示した比率を用いて計算した。

<sup>8</sup> 鬼塚、渡辺、西田, 日立造船技研報, 1980

<sup>9</sup> API(AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1981.) : Atmospheric Hydrocarbon Emission From Marine Vessel Transfer Operations, Publication 2514A

表 2.1-2 原油ガスの性状比較

単位:vol%

原油の原産地	C1	C2	C3	i-C4	n-C4	i-C5	n-C5	2MP	3MP	n-C6
Iranian-Light	3.4	16.0	34.0	8.4	22.0	4.9	5.5	1.3	0.6	1.7
Iranian-Heavy	4.8	14.3	32.7	8.8	22.8	5.1	5.8	1.4	0.6	1.8
Arabian-Light	8.9	4.8	18.8	6.6	29.7	7.4	12.6	2.6	1.2	4.4
Arabian-medium	3.2	4.6	26.8	7.6	29.0	7.2	11.5	2.3	1.0	4.0
Ohman	3.2	13.0	31.0	12.3	20.0	6.1	6.8	2.1	0.8	2.5
Qatar	2.0	13.5	33.0	8.7	24.0	5.6	6.8	1.5	0.7	2.2
Umm-sharif	11.5	13.6	24.5	8.6	25.5	5.1	.6	1.2	0.5	1.9

2MP;2-Methyl Pentane, 3MP;3-Methyl Pentane

(2) バラスト航海時のCH<sub>4</sub>排出状況

バラスト航海時にも、荷室内の圧力変動により原油ガスを含んだイナーートガスの排出が考えられる。CH<sub>4</sub>排出量は、荷室内のガス圧力がほぼ安定した蒸気圧になっているため、荷室内の圧力変動やそれに伴うガスの放出は積み荷時に比較して少ないと考えられる。

バラスト航海時の原油ガスを含むイナーートガス放出量は、前出の API(1981)によれば、1週間当たりおよそタンク容量の3%程度とされており、本報告書でもその数字を使用するものとする。

(3) 揚げ荷時のCH<sub>4</sub>排出の状況

揚げ荷時には、原油の移動とともに輸送パイプ内及び陸上側タンク内で原油ガスが発生するが、これらのガスは陸上側のグラウンドフレアスタックで助燃剤とともに燃焼処理されている(図 2.1-3参照)。従って、原油ガスの環境中への排出はごく少ないものと考えられる。

船舶側では、揚げ荷速度に対して船上のイナーートガス発生速度が遅いことがあるため、揚げ荷作業により生じる圧力低下を事前に補填する目的で荷室内をあらかじめ増圧する操作が行われる。この場合もイナーートガス排出弁の設定圧力を超えて封入することは少ないため、原油ガスの環境中への排出は少ないと考えられる。

原油ガスの排出量は、API(1981)によれば原油入荷総体積の6%とされており、ここでもその値を使用するものとする。

(4) 積み荷時のCH<sub>4</sub>ガス排出の状況

最も多量の原油ガスが大気中に放出されるのは、積み荷時である(図 2.1-4参照)。バラスト航海中に荷室全体に充填されたイナーートガスは原油ガスを含んでいる。また、原油の充填に伴って蒸散した原油ガスが積荷に伴って放出される。この間、新たなイナーートガスの注入はないため、イナーートガス中の原油ガスの濃度は上昇し続け、積荷終了間際には飽和蒸気圧付近の高濃度にまで達していることが予想される(図 2.1-5)。

同オペレーションに伴う排出量はかなり多量になると予想されるため、できるだけ詳細な検討が必要となる。そこで、ここでは積み荷時の放出ガス量をシミュレーションにより予想した。また、計算結果を陸上タンクへの積み込み時の調査結果によって検証した。

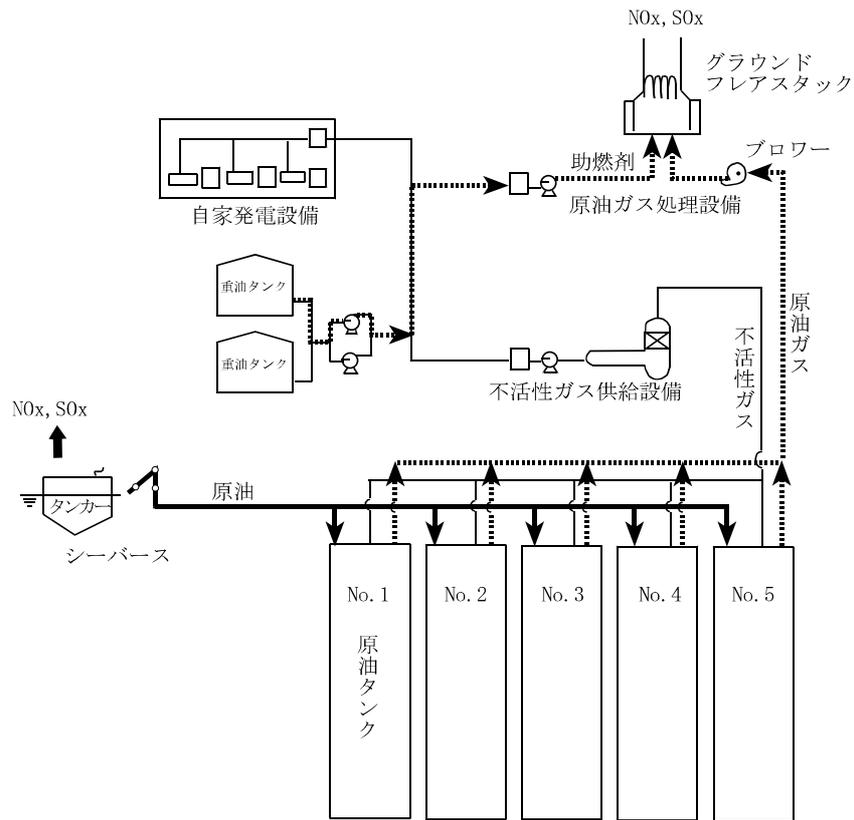


図 2.1-3 原油揚げ荷オペレーション時の荷室内ガスの移動概念図

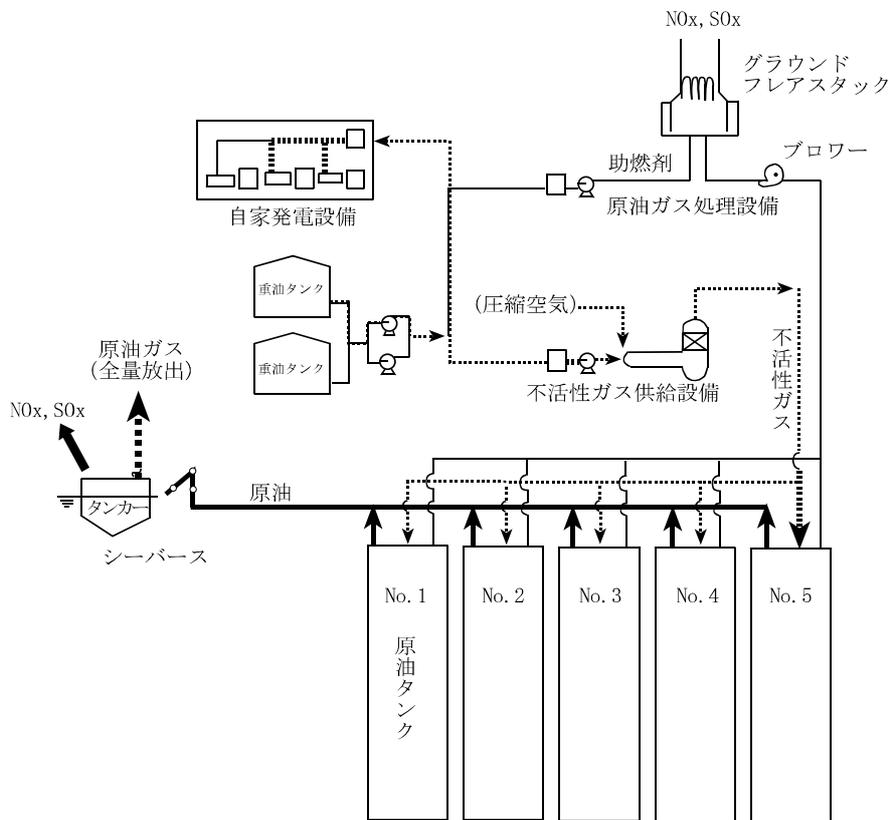


図 2.1-4 原油積み荷オペレーション時における荷室内ガスの移動概念図

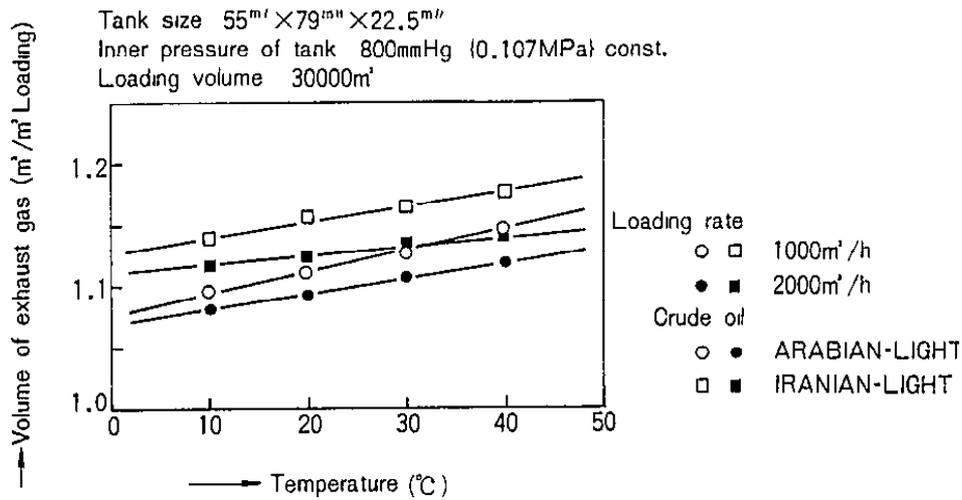


図 2.1-5 原油入荷量当たりのガス放出量の理論値<sup>8</sup>

原油備蓄タンクにおける原油注入時のタンク内原油ガス濃度の推測

(シミュレーション手法の検証)

イナートガス中に含まれる原油ガスの濃度の時間変化は、次式により示される<sup>8</sup>。

$$P_{n+1} = P_n \left\{ 1 + \frac{A(P_n)}{H_n} (\sqrt{n+1} - \sqrt{n}) \right\}$$

ここに、

$P_n, P_{n+1}$  : タンク内圧 (mmHg)

$A(P_n)$  : タンク内圧  $P_n$  での蒸発速度係数 ( $m^3/m^2 \cdot h^{1/2}$ )

$H_n$  : タンク内容積 ( $m^3/m^2$ )

: 時間 (ここでは h)

原油を入荷する場合 :

$$C'_{n+1} = C'_n + (1 - C'_n) \cdot \frac{A(P_n)(\sqrt{n+1} - \sqrt{n})}{H_n - Q_0 \cdot \Delta \tau}$$

原油ガス排出弁上限圧以下で貯油する場合 :

$$C'_{n+1} = C'_n + \frac{A(P_n)(\sqrt{n+1} - \sqrt{n})}{H_n}$$

貯油中に原油ガス排出弁上限圧を超えた場合 :

$$C'_{n+1} = C'_n + (1 - C'_n) \cdot \frac{A(P_n)(\sqrt{n+1} - \sqrt{n})}{H_n}$$

ここに、

$C'_n, C'_{n+1}$  : 炭化水素の均一濃度 ( $m^3/m^2$ )

$A(P_n)$  : タンク内圧  $P_n$  での蒸発速度係数 ( $m^3/m^2 \cdot h^{1/2}$ )

$Q_0$  : 原油入荷速度 ( $m^3/m^2 \cdot h$ )

Arabian light で 20 の条件下におけるタンク内の原油ガス(炭化水素類)濃度の推定値を図 2.1-6にまた、同じタンク条件下における石油備蓄基地における実測値<sup>10</sup>との比較を表 2.1-3に示した。

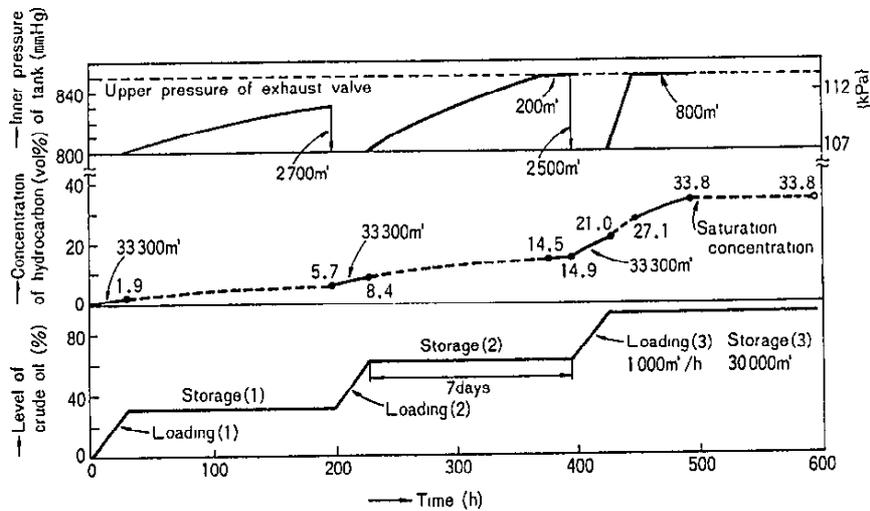


図 2.1-6 原油備蓄タンク内のVOC濃度の推定(鬼塚ほか,1980)

表 2.1-3 原油備蓄タンク内のVOC量の実測値例

入荷回数	モデル計算による 推定値	総VOC濃度 実測値
1回目	5.7 %	4.6 %
2回目	14.5 %	16.5 %
3回目	33.8 %	40.5 %

実測値は上五島原油備蓄基地環境影響評価書資料より

これらにより明らかのように、タンク中の VOC 濃度は数度にわたる原油注入に応じて鋸歯的に変化するが、シミュレーションの結果はこの状況を良く再現しており、上記の予測式の妥当性が認められた。

#### 原油タンカーにおける原油荷積み時のタンク内原油ガス量の推定

次に、上記の予測式を用いてタンカーへの積み荷時の発生 VOC 量についてシミュレーションを行った。予測に際してタンク内の深さ、原油入荷速度などの値は実船調査から得た。

実船調査の詳細は表 2.1-4のとおりである。タンクからのガス採取では、手動でテトラバッグへガスシリンダー(SKC 製、VAC-U-TUBE)を用いて 200ml を採取し、船外で FID(水素炎イオン化検出器)法により定量分析を行った。

表 2.1-5はバラスト航海時の原油タンク内におけるガス組成をタンクの深さ別に示したものである。深さ方向には、TOC で最大 0.9%程度の濃度差が見られるが、メタンなどの組成比には偏りは見られず荷室内ガス中のおよそ 0.6%を占めた。表 2.1-6はタンク内のガス組成に対しての原油洗浄の影響を示す。荷揚げ中に原油洗浄を行った場合、タ

<sup>10</sup> 上五島石油備蓄公社、環境影響評価書より計算。入荷前にはタンク内の圧力を800 mmHgに調整するため何度かタンク内のガスの放出が行われる。この際フレアスタックへのイナータガス中濃度を測定したもの

ンク内 VOC 濃度は 10%程度から 15%程度増加している。なお、荷揚げ後 24 時間経た場合のガス組成濃度は洗浄の有無に関わらずほぼ一定であった。

表 2.1-7は積み荷時のタンク内ガス濃度の時間変化の実測値である。

表 2.1-4 調査対象船舶及び調査期間など

対象船	原油タンカー
調査期間	2000年12月1日～12月9日
総トン数	約70,000総トン
航路	国内原油備蓄基地-国内石油精製工場
積荷	Quate、Iranian Heavy、Arabian Light原油の混合。
分析項目	FID/MS(水素炎イオン化検出器)を用いた炭素数7までの揮発性炭化水素ガス濃度及びそれらの総計として TOC(総炭化水素量)濃度

表 2.1-5 バラスト航海時のタンク内原油ガス組成濃度(vol%)  
(深さ方向の変化、出港後 約24時間後)

タンク頂部と採取ポイントの距離	1m	5m	10m	15m
メタン	0.59	0.58	0.63	0.62
エタン	0.66	0.67	0.71	0.70
プロパン	2.27	2.31	2.45	2.41
ブタン	3.19	3.25	3.44	3.38
ペンタン	2.00	2.05	2.17	2.14
ヘキサン	0.89	0.91	0.97	0.95
ヘプタン	0.27	0.28	0.30	0.29
TOC	9.86	10.06	10.70	10.50

ほぼ+300mmHg に加圧された状態から常圧まで点検口を開放し減圧した後に、採取した。

表 2.1-6 原油洗浄作業による揚げ荷作業直後のタンク内原油ガス組成濃度への影響(vol%)

	バラスト航海出向直後	
	原油洗浄なし	原油洗浄実施
メタン	0.61	0.87
エタン	0.69	0.82
プロパン	2.37	3.72
ブタン	3.32	5.19
ペンタン	2.08	2.97
ヘキサン	0.92	1.07
ヘプタン	0.28	0.23
TOC	10.26	14.89

表 2.1-7 原油積み込み作業直後及び積荷航海時のタンク内原油ガス組成濃度(vol%)

(入荷開始からの経過時間)	出港直後	積荷航海時	
	6時間後	40時間後	48時間後
メタン	4.51	6.75	7.42
エタン	7.52	8.16	8.34
プロパン	14.59	14.82	15.05
ブタン	9.82	9.93	10.04
ペンタン	3.65	3.67	3.69
ヘキサン	1.22	1.22	1.21
ヘプタン	0.33	0.33	0.32
TOC	41.63	44.88	46.07

深さ方向の採取点は一点

以上の調査結果に基づき、シミュレーションを実施した。シミュレーションにおいてはタンクの容積;20,000m<sup>3</sup>、深さ;20m、積荷速度;1000m<sup>3</sup>/hとした。蒸発速度係数は今回のケースでは油種は混合であることから 800mmHg において 1.0 とした。また、タンカーの場合では積み荷は一度に行われるが、積み荷初期からタンク内の圧力の急上昇が発生しないように、弁制御が行われているため、入荷量と同量のガスが放出されるものと仮定した。排出ガス中の VOC 濃度の初期値は 10% と仮定した(表 2.1-5)。

シミュレーション結果(図 2.1-7)では、40 時間後の VOC 濃度はほぼ 40% に達しており、その後の推移の状況も実測結果(表 2.1-7)とよく一致している。

そこで、このシミュレーションを用い、放出される発生ガス量の積分値(大気圧に換算)を求めたところ、その値は原油積み荷総体積の約 1.8 倍とされた。また、VOC 放出量は表 2.1-6 から発生ガス量のほぼ 40%、原油積み荷総体積の約  $1.8 \times 0.4 = 0.72$  倍と想定された。

以上のことから、積み荷時にタンカーから放出される VOC 放出量は表 2.1-8 のように集約される。

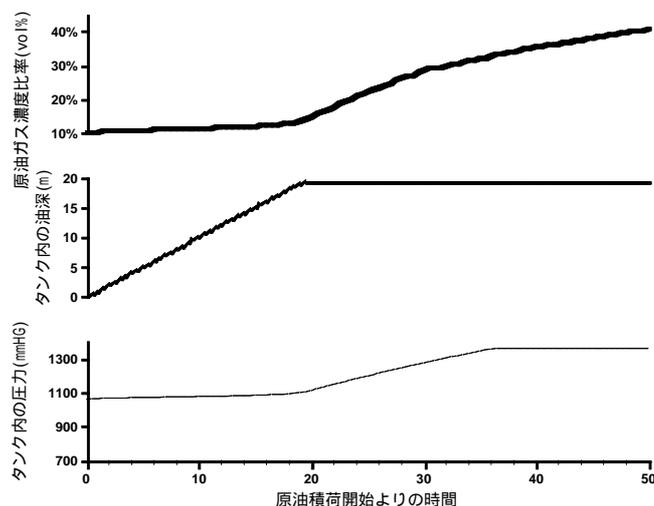


図 2.1-7 タンク内濃度上昇のシミュレーション結果

表 2.1-8 タンカー積み荷時の原油ガス排出量

	ガス排出量
全ガス容積	1.8 × vol
VOC容積	0.72 × vol
CH <sub>4</sub> 容積	0.11 × vol (as CH <sub>4</sub> ca.15vol%/VOC) 原油の産地ごとにCH <sub>4</sub> 含有量は異なる
vol : 原油の積み込み量(m <sup>3</sup> )	

### 2.1.3 船舶からのCH<sub>4</sub>排出量のまとめ

以上の結果に基づき、1996年における世界の原油移動に伴う原油ガス排出量及びCH<sub>4</sub>排出量を算出した。原油の総移動量にはFearnleysの統計値を用い、原油種が異なると思われる地域ごとに集約し、さらに京都議定書の附属書 締結国<sup>11</sup>とそれ以外の国別に集計した(表 2.1-9)。

表 2.1-9 原油の移動総量

単位：10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>

国種別	輸出	輸入
附属書 締結国 <sup>11</sup>	466,229	1,407,873
附属書 締結国以外	1,437,647	542,461
世界総計 (128ヶ国)	1,903,876	1,950,334

1996 Energy Statistics Yearbook より作成。

積荷航海中には、1week当たり原油積荷体積の5%のイナータガスの放出があるものとし(2.1.2(1)参照)、そのVOC濃度は45%と仮定した(表 2.1-6右端欄参照)。また、平均輸送日数は原油タンカーの平均輸送マイルなどから計算される3weekとした。

原油の揚げ荷時に全てのタンカーが原油洗浄を行うと仮定し(ビルジの発生量を抑えるため最近では原油洗浄を行うことが多い)、そのVOC濃度は15%であると仮定した(表 2.1-6中欄参照)。また、1week当たり原油移動体積量の3%のイナータガスの放出があるものとした(2.1.2(2)参照)。

揚げ荷時のVOC放出量は原油入荷総体積の6%とした(2.1.2(3)参照)。

積み荷時の排出については、2.1.2(4)に述べた試算に基づき、総ガス排出量は原油入荷総体積の1.8倍、VOC排出量は0.72倍と仮定した。

なお、各VOC中に含まれるCH<sub>4</sub>の組成は産地別に設定した。

結果は表 2.1-10に示すとおりで、原油輸送に伴い排出されているメタンの排出量は約138 × 10<sup>3</sup>t-CH<sub>4</sub>/年、地球温暖化係数(GWP)21を乗じてCO<sub>2</sub>換算とすると、2.9 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年と見積もられた。また、機関からの排出分は37 × 10<sup>3</sup>t-CH<sub>4</sub>で、同じく地球温暖化係数(GWP)21を乗じると、0.78 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年と見積もられた。そして、その合計値は175 × 10<sup>3</sup>t-CH<sub>4</sub>/年、3.7 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年とされた。この値は船舶からのCO<sub>2</sub>排出量(375 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年)の約1.0%に当たる。

ただし、船舶の運航に伴う排出の一つとして、荷役時の排出をIMOの管轄する排出量としてカウントするべきか否かについては、今後検討の余地がある。原油輸送に伴うCH<sub>4</sub>排出量を国別でみると、温室効果ガスの削減義務のない附属書 国以外の輸送行為に伴いその

<sup>11</sup> 附属書 締結国

京都議定書において温室効果ガスの削減について目標設定、政策、措置を取ると定められた国々。

オーストラリア、オーストリア、ベラルーシ(注)、ベルギー、ブルガリア(注)、カナダ、チェッコ・スロヴァキア(注)、デンマーク、欧州経済共同体、エストニア(注)、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシャ、ハンガリー(注)、アイスランド、アイルランド、イタリア、日本国、ラトヴィア(注)、リトアニア(注)、ルクセンブルグ、オランダ、ニュー・ジーランド、ノルウェー、ポーランド(注)、ポルトガル、ルーマニア(注)、ロシア連邦(注)、スペイン、スウェーデン、スイス、トルコ、ウクライナ(注)、グレート・ブリテン及び北部アイルランド連合王国、アメリカ合衆国

注：市場経済への移行の過程にある国

72%が発生している。また、積み荷作業が陸上施設の責任で行われていることから考えると、これを陸上起因とするか、輸送機関起因とするかで、外航船による温室効果ガスの排出量の評価もその削減シナリオも異なってくる。

なお、NMVOC排出量はCH<sub>4</sub>排出量の約10倍程度の放出がある。これらは海上や積荷地付近においてNO<sub>x</sub>やO<sub>3</sub>の前駆物質あるいは悪臭の原因となっている可能性があり、別途注意を払う必要があるものと考えられる。

表 2.1-10 CH<sub>4</sub>の年間排出量

単位：10<sup>3</sup> トン/年

	原油輸送に伴う排出量					主機からの排出量	総計
	積み荷時	揚げ荷時	積荷航海時	バラスト航海時	合計		
附属書 締結国	29.5	7.3	1.4	1.0	39.3	-	-
附属書 締結国以外	91.0	2.8	4.4	0.3	98.5	-	-
世界総計	120.5	10.1	5.9	1.3	137.9	37.3	175.2
(CO <sub>2</sub> 換算値)	2,531.1	213.1	124.3	28.0	2,896.4	783.7	3,680.1

附属書 締結国：京都議定書において GHG 削減目標の設定義務がある国

附属書 締結国以外：(世界総計の値) - (附属書 国の値)

## 2.2 N<sub>2</sub>O排出量の推定

### 2.2.1 排出量の文献調査結果

一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)は、内燃機関等による燃料の燃焼や石油化学工業の副産物及び家畜糞尿や堆肥から発生することが知られている。

例えば、「気候変動に関する国際連合枠組条約」に基づく第二回の日本国報告書によると、1998年度のN<sub>2</sub>Oの排出量は、合計で64 × 10<sup>3</sup>トン/年で、燃料消費による排出が約40%、工業プロセスによる排出が約40%を占めている(図 2.2-1)。

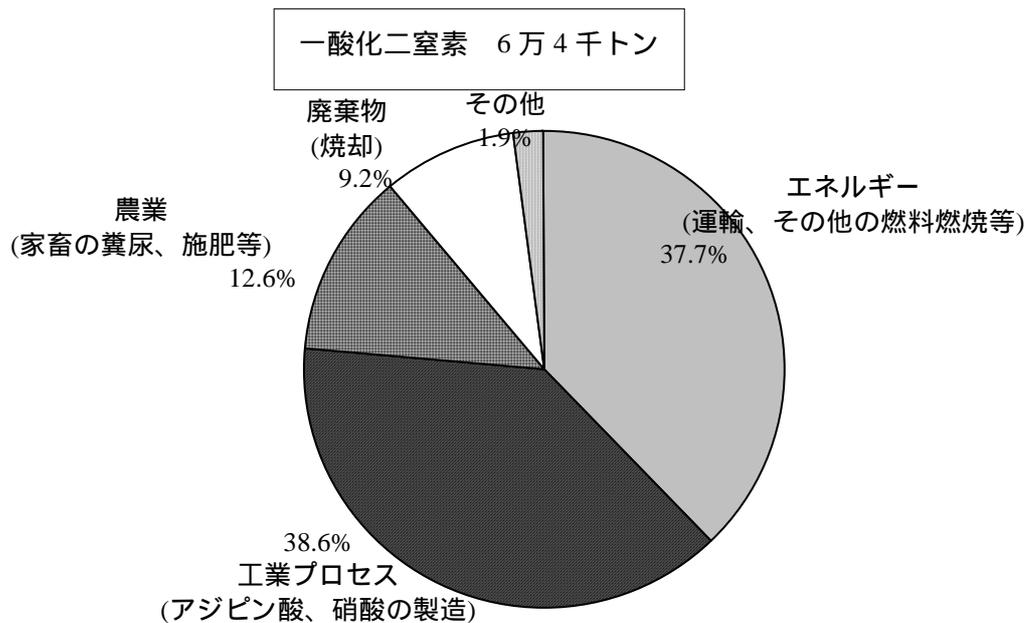


図 2.2-1 日本国における陸上からのN<sub>2</sub>O排出量(1998年度)

燃料の燃焼に伴うN<sub>2</sub>Oの排出は、燃焼雰囲気中においてFuel NO<sub>x</sub>あるいはThermal NO<sub>x</sub>への酸化が完全に進行しない場合に生成されるものであるが、排気中水分がある状態でSO<sub>x</sub>とNO<sub>x</sub>との反応からも生成するとも言われており、その生成過程は必ずしも解明されていない。

自動車用ディーゼル機関と大型船舶とのN<sub>2</sub>O排出原単位について、IPCCガイドライン値を表 2.2-1に示す。

排出係数としてIPCC報告値の0.08g/kg-Fuelを用いると、全世界での船用機関からのN<sub>2</sub>O年間排出量は約10.0 × 10<sup>3</sup> トン/年であり、地球温暖化係数310を乗じてCO<sub>2</sub>量に換算すると3.1 × 10<sup>6</sup> t-CO<sub>2</sub>/年と計算され、CO<sub>2</sub>排出量(374.6 × 10<sup>6</sup>t-CO<sub>2</sub>/年)の約0.8%となる。

また、実際の国内における測定結果をみると、表 2.2-2及び表 2.2-3に示すようになっている。表 2.2-3は陸上機関の測定データであるが、C重油焚きのほうが全体としては排出係数が大きい傾向がみられる。また表 2.2-2に示した船用のデータでは、2サイクルと4サイクルで傾向が異なるが、特に高負荷において低い値が観測されている。

表 2.2-1 IPCCガイドラインによるN<sub>2</sub>O排出係数

< IPCCガイドライン値 >

Emission sources	N <sub>2</sub> O emission factor g/kg-Fuel
Vessels	0.08*
Boats	0.08
Machinery for Agriculture	0.08
Diesel vehicle	0.08
Gasoline vehicle	0.30

\* : MEPC45/8での採用値

表 2.2-2 船舶技術研究所による船用ディーゼル機関におけるN<sub>2</sub>O排出係数

4cycle engine	85% steady load	0.12
	25% steady load	0.58
2cycle engine	85% steady load	0.07
	25% steady load	0.03

船舶技術研究所(2000)、「平成 12 年度船舶技術研究所研究発表会講演集、船用ディーゼル機関から排出される亜酸化窒素の排出特性」より計算

表 2.2-3 陸上固定ディーゼル機関におけるN<sub>2</sub>O排出係数

施設種別	燃料種	酸素濃度 (%)	N <sub>2</sub> O濃度 (ppm)	排出係数 g/kg-Fuel
ディーゼル機関(常用)	C 重油	13.8	1.97	0.095
ディーゼル機関(常用)	C 重油	12.9	2.92	0.134
ディーゼル機関(常用)	A 重油	15.5	0.87	0.042
		15.5		
		15.5		
ディーゼル機関(常用)	A 重油	10.2	1.83	0.060
ディーゼル機関(常用)	A 重油	12.5	1.08	0.039
		12.5	1.10	
		12.6	1.09	
ディーゼル機関(常用)	A 重油	13.1	2.47	0.111
		13.2	2.21	
		13.2	2.40	
ディーゼル機関(常用)	C 重油	13.5	1.8	0.092
		13.5	1.7	
		13.5	2.0	
		13.5	2.4	
ディーゼル機関(常用)	A 重油	13.7	1	0.039
		13.7	1	
		13.7	1	
		13.7	1	
ディーゼル機関	A 重油	18	0.60	0.039

環境省(2001)、「温室効果ガス排出量算定方法検討会報告書より各種炉(C H 4 , N 2 O)報告書」

各機関負荷ポイントおよび発電特性かどうかは不明

## 2.2.2 排出量の実船調査結果

### (1) 対象船舶

N<sub>2</sub>Oの排出実態を把握するために、表 2.2-4及び表 2.2-5に示した2隻を対象に排ガス測定を行った。

表 2.2-4 2サイクル船調査概要

船種	原油タンカー
総トン数	約70,000総トン
載荷重量	約100,000 DWT
主機	720mm×2,500mm直列6気筒
機関形式	2サイクル、単動、排気ターボチャージャー付き、逆回転機構付き
出力	約19,000PS@81rpm
推進方式	FPP直結
航海速力	18 knt
調査期間	2000/12/1-12/9

表 2.2-5 4サイクル船調査概要

船種	内航RORO船
総トン数	約1,100総トン
載荷重量	約7,000 DWT
主機	570mm×660mmV型12気筒
機関形式	4サイクル、単動、排気ターボチャージャー付き
出力	約22,000PS@430rpm
推進方式	CPP(減速機、S/G付き)
航海速力	21 knt
調査期間	2000/12/11-12/18

### (2) 測定対象物質

排ガス中：NO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>O、SO<sub>2</sub>、CO、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、THC

### (3) 測定方法

主機排ガス中の汚染物質は表 2.2-6に示す測定原理による乾式測定器を用いた連続測定を行った。また、その他の測定項目及び排ガス測定時に使用された燃料性状の測定結果は、表 2.2-7、表 2.2-8に示した。

連続測定器は振動に弱いことが知られているため、反応セルに防振対策を施した機種を選択するとともに、測定器自体を防振台に搭載するなどの方策をとった。排ガス量は周辺外気の吸い込みなどが生じていないかを酸素濃度などから検討した上で、炭素バランス法(CO<sub>2</sub>とCO)及び燃料消費量から推定した。

サンプリング点は、排ガスエコノマイザーより上流側で、流速が比較的早い部位(動圧測定口及び点検フランジ)を選択し、煙道中心部までステンレス製12のサンプリング管を複数取り付け、排ガスサンプリングを行った。サンプリング直後にドレーンポットを設置し、ドレーン及び大粒径のばいじんの除去を行い、テフロンチューブで前処理装置に導いた。前

処理装置では、ミストキャッチャー、紙フィルターを通過させた後、電子クーラーに導き、露点 5 まで乾燥冷却を施した。電源は 100V 15A の船内電源に常時インバーター方式の安定化電源を接続し使用した。

表 2.2-6 排ガス測定機器

測定物質	測定機器名及び測定原理
CO <sub>2</sub>	堀場製作所VIA510-CO2 NDIR(非分散型赤外線分析計)
CO	堀場製作所VIA510-CO NDIR(非分散型赤外線分析計)
NO <sub>x</sub> (NO及びNO <sub>2</sub> )	堀場製作所VIA510SS-NO <sub>x</sub> CLD(化学発光分析計)
N <sub>2</sub> O	堀場製作所VIA510-N2O NDIR(非分散型赤外線分析計)
SO <sub>2</sub>	堀場製作所VIA510- SO2 NDIR(非分散型赤外線分析計)
O <sub>2</sub>	堀場製作所MPA510- O2 磁気圧
THC (Total Hydro Carbon)	堀場製作所VIA510-THC NDIR(非分散型赤外線分析計)

表 2.2-7 その他の測定項目

項目	方法など
主機の運転状況	機関室内の計器類から、燃料消費量、燃料ラック位置、回転数、軸馬力、プロペラ角(FPP船のみ)、排ガス温度、タービン回転数、機関取り入れ温度、絶対湿度を、読み取った。
燃料性状	ロットごとの燃料性状表を機関室より入手。ピュリファイ後の燃料を500ml程度抜き取り、性状分析を実施した。

表 2.2-8 燃料性状分析結果

項目	4 サイクル	2 サイクル
比重	0.9646	0.9864
反応	中性	中性
引火点	117	86.0
粘度cSt@50	173	179
流動点	-5.0	-12.5
残留炭素(wt%)	10.2	11.8
水分(vol%)	0.795	0.1
灰分(wt%)	0.029	0.020
硫黄分(wt%)	2.52	2.96
真発熱量(J/g)	43,100	42,780
(cal/g)	10,296	10,220
Si+Al(wt ppm)	2.5	3.5
窒素分(wt%)	0.35	0.23

#### (4) 測定結果

2 サイクル機関の図示負荷と排ガス濃度の関係を図 2.2-2及び表 2.2-9に示した。また、4 サイクル機関の測定結果を同様に図 2.2-3、表 2.2-10に示した。濃度はいずれも O<sub>2</sub> 13%換算を行い、NO<sub>x</sub> については ISO 8178 に基づいて、大気条件(温度、絶対湿度)の補正を行った(過給機内でのドレーンの発生はないものとした)。

2 サイクル機関の場合、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> が負荷に対して正の関係をとりという典型的な船用機関の特性が認められた。また、CO が負荷に対して減少傾向にあること、図示負荷が 5 を超えた状態から排気温度が 300 強で安定していることから、燃焼状態は高負荷域において良好と考えられた。しかし、THC については高負荷側で増加傾向を示しており、N<sub>2</sub>O では山状の排出特性を示した。

4 サイクル機関では、2 サイクル機関と異なり、N<sub>2</sub>O、NO<sub>x</sub> で高負荷域においてピークを示した一方で、CO は負荷の増加に従い単純減少を見せている。機関部員への聞き取りによると、本機関は高負荷域において燃焼が安定する傾向にあり、84%負荷時点で気筒毎の排気温度のばらつきや測定機のフィルターの汚れも少ない傾向にあった。このため、83%付近の負荷において、やや燃焼状態が悪い状態にあることが予想される。

各機関において、ISO8178 サイクルで重み付けした場合の排出係数は、表 2.2-11に示すとおりである。高負荷の排出濃度及び燃料消費率は、測定時における最大負荷の値で代用した。

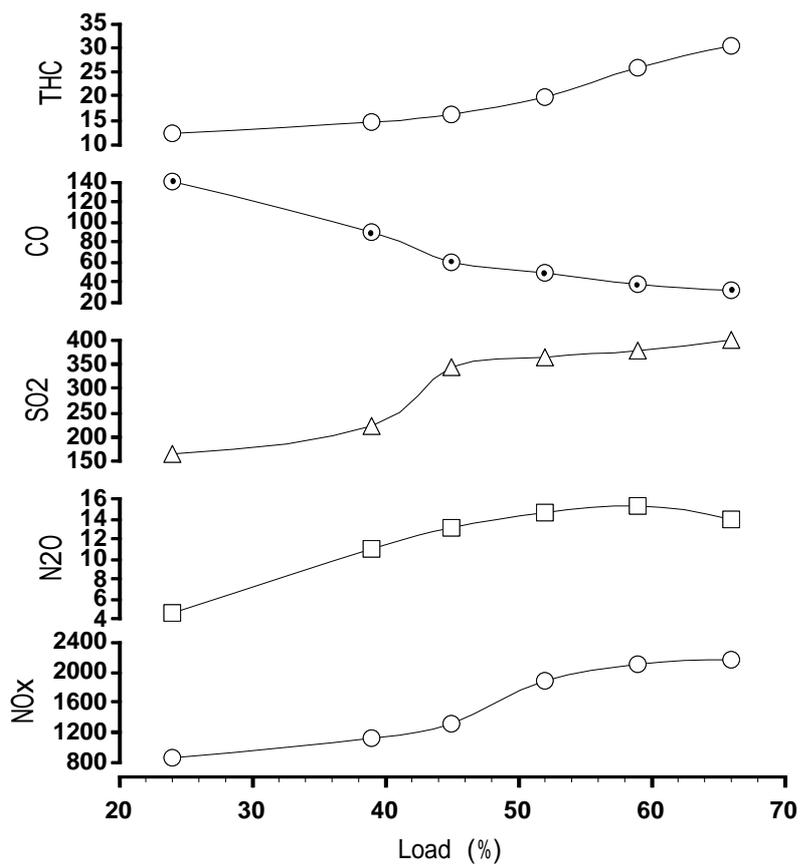


図 2.2-2 2サイクル機関の排ガス性状(単位：ppm)

表 2.2-9 2サイクル機関の排ガス性状

単位:ppm

Load Ind(%)	24	39	45	52	59	66
RPM	23	33	60	66	74	78
NO <sub>x</sub>	850	1109	1305	1873	2089	2148
N <sub>2</sub> O	4.5	10.9	13	14.5	15.2	13.8
SO <sub>2</sub>	163	220	342	363	376	398
CO	139	89	59	48.3	36.7	31.3
O <sub>2</sub>	17	16.8	14.9	14.8	14.4	14
THC	12	14.3	15.9	19.5	25.6	30.1
Exhaust temp	229	265	286	300	306	312

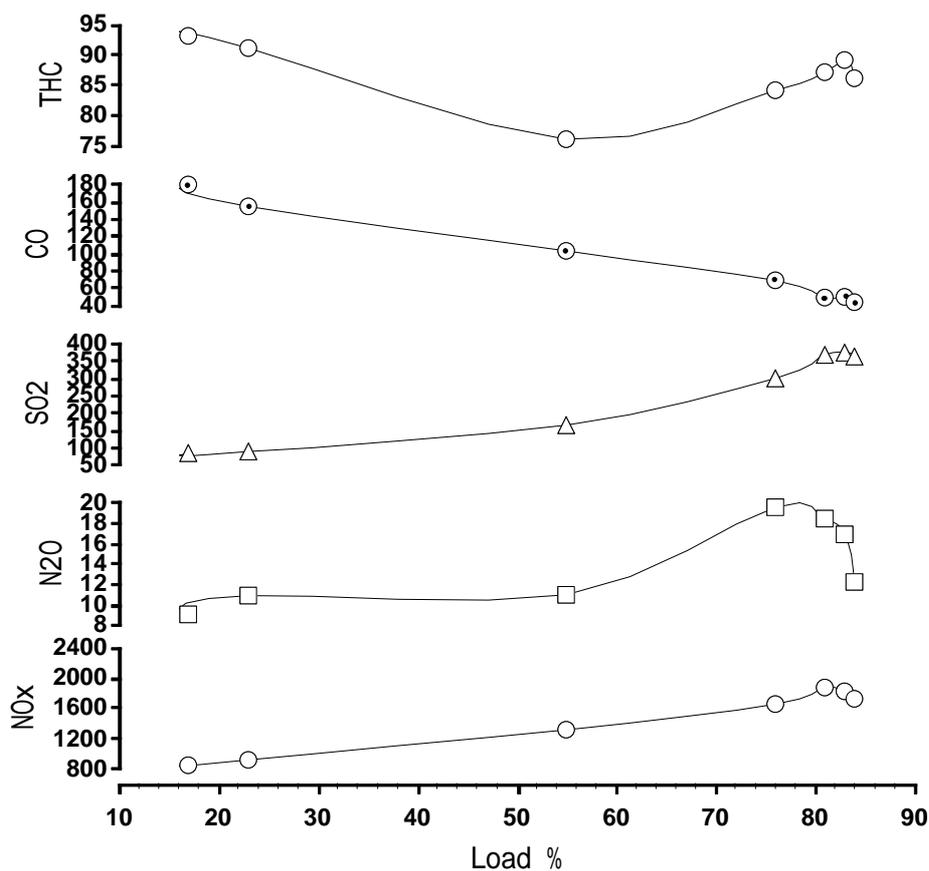


図 2.2-3 4サイクル機関の排ガス性状(単位はすべてppm)

表 2.2-10 4サイクル機関の排ガス性状

単位:ppm

Load ratio %	17	23	55	76	81	83	84
RPM	650	890	1200	1450	1680	1750	1800
NO <sub>x</sub>	840	910	1310	1640	1860	1810	1710
N <sub>2</sub> O	5.6	10.8	10.9	19.5	18.4	16.8	12.1
SO <sub>2</sub>	82	86	163	298	365	372	360
CO	178	153	102	68	48.3	48.9	42.6
O <sub>2</sub>	18.1	16.4	15.4	13.3	13.2	13.2	13.1
THC	93	91	76	84	87	89	86
Exhaust temp	238	352	368	383	391	408	415

表 2.2-11 実測値からISO8178サイクルで計算したN<sub>2</sub>Oの排出係数の比較

機関の種類	排出係数
2サイクル	0.095 g/kg-Fuel
4サイクル	0.121 g/kg-Fuel
IPCCガイドライン	0.080 g/kg-Fuel

### 2.2.3 船舶からのN<sub>2</sub>O排出量のまとめ

実船調査で得られた結果は、先の表 2.2-1に示したIPCCガイドライン値(0.08g/kg-Fuel)よりもむしろ10~20%高い値であったが、今回の調査のみで代表値とするには、サンプル数が少なすぎると考えられた。そのため、排出係数として、今回は2.2.1で示したIPCC報告値の0.08 g/kg-Fuelを用いることとした。

この場合、全世界での船用機関からのN<sub>2</sub>O排出量は $10.0 \times 10^3$  t-N<sub>2</sub>O/年、CO<sub>2</sub>換算で $3.1 \times 10^6$  t-CO<sub>2</sub>/年となり、CO<sub>2</sub>排出量( $374.6 \times 10^6$  t-CO<sub>2</sub>/年)の約0.8%となるが、実船調査結果も考慮すると概算でおおよそCO<sub>2</sub>排出量の約1%程度の寄与を占めるものと考えられる。

### 2.3 代替フロン類(HFCs)漏洩量の推定

IPCC報告書では、以下の13物質を「ハイドロフルオロカーボン(HFCs)」として規定しており、陸上での主な漏洩源は、業務用家庭用の冷蔵冷凍施設およびエアコンディショナー内の冷媒が機器製造時、使用時、廃棄時にそれぞれ漏洩するもの、ウレタンフォームなどの発泡剤としての利用に伴い、発泡時、使用時、廃棄時にそれぞれ漏洩する量が挙げられる。

HFC-23, HFC-32, HFC-41, HFC-125, HFC-134, HFC-134a, HFC-143,  
HFC-143a, HFC-152a, HFC-227ea, HFC-236fa, HFC-245ca, HFC-43-10mee

船舶におけるHFCsの最大の利用分野は冷蔵・冷凍コンテナ(いわゆるリーファーコンテナ reefer container)であり、定性的には冷媒再充填時に相当量の冷媒が大気中に放出されることが推測される。なお、R22など「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」の指定物質で実質使用禁止となっているフロン類も既存リーファーに対しては供給されていると考えられるが、今回は対象としない。

国際運輸用の冷蔵・冷凍コンテナについてはこれまでIPCCガイドラインの対象になっていないこともあり、使用に伴う実態把握は困難であった。冷媒の管理について聞き取り調査を行った結果、世界全体の海運向けの冷蔵・冷凍コンテナ向けの冷媒出荷量、販売量もしくは補充量について集計は行われていないことがわかった。同様に、1998年時点で生産された陸上固定用を含めた冷蔵・冷凍コンテナに使用されている冷媒量は、約半分がHFC-134aであり、次いでHFC-143a及びHFC-143という聞き取り結果もあったが、冷媒の種類による冷蔵・冷凍コンテナ個数の集計も全世界的には行われていない。従って、現段階において代替フロンの漏洩量を正確に推定することは困難であると考えられる。また、大型冷蔵・冷凍コンテナの使用に伴う漏洩を考える場合、その全量を船舶運航に伴うものとして扱うかどうかについては異論もあろう。陸上輸送時あるいはコンテナヤード内での漏洩量もあり、特にメンテナンスや廃棄時は陸上で行われる事が通常であるためである。これまでカウントされてこなかった冷蔵・冷凍コンテナの漏洩については、IPCCなどを含めて国際的な場でその帰属についても議論されるべきであり、その前提として、基礎的な統計データの整備が望まれる。

ここでは冷蔵・冷凍コンテナの使用に伴う代替フロン類の漏洩量の目安をつけるため、財団独自で漏洩量の推定を行った。

聞き取り調査の結果をもとに、冷蔵・冷凍コンテナの耐用年数を20年とし、この間に20回冷蔵・冷凍コンテナの初期冷媒注入量(約30kg)のおおよそ3~5倍の冷媒量が補給されると仮定した。

現在流通する冷蔵・冷凍コンテナは、Nomadic資料に基づき、1995年流通ベースで約61万TEU、年間6%の伸びがあるものとし1997年の流通量を61万TEU×1.12=約68.3万TEUとする。その全冷媒量は $683 \times 10^3 \times 30\text{kg} = 20,496\text{t}$ と計算される。その3~5倍量が20年間で補給され、これが大気中にすべて放出されたと仮定すると、年間の平均漏洩量は以下のように計算される。

3倍時  $20,496 \times 3 \div 20 = 3.07 \times 10^3\text{t}$   
5倍時  $20,496 \times 5 \div 20 = 5.12 \times 10^3\text{t}$

リーファーの冷媒をR134aなどを含む混合物であり、平均的な地球温暖化係数をHCFC-22(R22)の1,700と同等と仮定すると、CO<sub>2</sub>換算後の排出量は、およそ $5.2 \sim 8.7 \times 10^6 \text{ t-CO}_2/\text{年}$ と計算される。

### 3 外航船舶の運航に伴う各温室効果ガスの排出量推定

1で検討したCO<sub>2</sub>排出量と2で検討したCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガス3物質の排出量の結果を表3-1に集約した。今回3物質排出量の試算を行ったが、必ずしも十分な精度のあるものではなく、仮定や推測に基づく数値となってしまった。これは、実測のサンプル数が、陸上測定を含めて充分であるとは言えないため、燃料種や機関形式(2サイクル、4サイクルの差異)の影響が定性的にも明らかになっていないこと、また計算の基礎数値となる統計値も陸上発生源に比較して整備されていないことによる。

今回の試算によると、CO<sub>2</sub>以外の3物質温室効果ガスの排出量及び漏洩量は、外航船舶の運航に伴う温室効果ガス排出総量の4%程度(CO<sub>2</sub>換算)になるものと考えられた。3物質の中では、冷蔵・冷凍コンテナから漏洩によるHFCs寄与割合が多く、1~2%程度を占めていると推定された。特に、冷蔵・冷凍コンテナの総量の増加割合はコンテナ全体の増加割合を上回っていることから、HFCsの排出量割合は今後増大する可能性も予想される。

また2章の冒頭にも述べたように、CH<sub>4</sub>及びHFCsの排出量については、これを海運に伴う排出としてカウントするのか、あるいは荷役作業が行われた港湾の排出としてカウントするのか、荷主の所属する国の排出としてカウントとするのかといった、いわゆるアロケートの問題がある。今後はCOPの場において、これら境界領域で発生する排出量のカウントについて議論をして行く必要があると考えられた。

参考として、日本国の国内排出総量及び国内分のうち運輸部門の温室効果ガス排出総量に占める各物質の割合及び割合を表下欄に示し、3者を比較した。

CH<sub>4</sub>は、運輸部門の割合より大きく国内排出総量の割合より小さい。これは運輸全体では、運航に伴う排出を考慮せず機関からの排出のみをカウントしていること、また陸上発生の分野では農業など非燃焼系の排出を見込んでいることが主たる原因である。

N<sub>2</sub>Oは、運輸部門の割合、国内排出総量の割合よりともに小さい。これは運輸全体では、航空機及びガソリン機関の排出係数が大きいこと、また陸上発生では工業プロセスなど非燃焼系の排出を見込んでいることによる影響が大きいと考えられる。

HFCsは、運輸部門の排出割合は船舶の排出割合とほぼ同等であるが、国内排出総量との比較では1/3倍程度の割合しかない。これは、陸上発生源にはSF<sub>6</sub>及びPFCsの値も合算されているためである。HFCsに限っていえば、陸上施設では近年漏洩対策が充分進んでおり、その使用量は海上での使用に比較して削減が進んでいると予想される。

外航船舶の運航に伴う温室効果ガス排出削減を検討する場合、その主体をなすCO<sub>2</sub>に着目することは必然であるが、CO<sub>2</sub>以外の3物質についても適切な削減対策を講ずることにより、外航船舶の運航に伴う温室効果ガス排出総量の数%程度は削減できる可能性があり、CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの削減方策検討も重要な課題であると考えられる。

表3-1 外航船舶運航に伴う温室効果ガス排出量(1997年)

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFCs (R134a)
温暖化係数	1	21	310	1,700
船舶からの排出量 10 <sup>3</sup> t	373,100	175.2	10.0	(3.1 - 5.1)
CO <sub>2</sub> 換算値 10 <sup>6</sup> t	373.1	3.7	3.1	(5.2 - 8.7)
温室効果ガス排出量 合計値10 <sup>6</sup> t	385.1 - 388.6			
温室効果ガス排出 量に占める割合	96.0 - 97.0%	1.0%	0.8%	1.2 - 2.2%

参考 日本国における GHG 排出量割合<sup>1 2</sup>

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFCs (R134a)
温室効果ガス発生 総量に占める割合	88.1%	2.5%	2.0%	7.4%
運輸部門からのGHG 排出量に占める割合	96.2%	0.4%	1.8%	1.6%

日本国の HFCs 類の排出割合には、PFCs 及び SF<sub>6</sub> を含む。

HFCs の排出量は統計値が充填量が存在しない事から仮定に基づいた推定値である。

CO<sub>2</sub> 以外の 3 ガス排出量は試算であり、また港湾荷役時あるいはふ頭上での排出量を含む。

<sup>1 2</sup> 環境省(2001)、温室効果ガス排出量算定方法検討会報告書、運輸部門分科会報告書より作成。

#### 4 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>排出量の将来予測

本章では船舶運航に伴って排出される温室効果ガスの大半を占めるCO<sub>2</sub>排出量について、何らかの対策を講じなかった場合の将来予測を行う。CO<sub>2</sub>排出量の将来予測を行うためには将来の荷動き量つまり輸送総量と、それを運ぶ全船腹量つまり輸送容量の予測が必要であるから、4.1において各船種ごとの輸送総量ならび輸送容量の将来予測を行い、4.2において両者の予測に基づいた年間燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量の予測を行った。

##### 4.1 輸送総量ならびに輸送容量の将来予測

種々の経年的なトレンドから、将来の燃料消費量を算出することは、予測においてよく用いられる手法である。例えば、世界(あるいはOECD国)の過去の経済成長率と、1.4.2で示した統計値から求められた燃料消費量の年増加率との相関をとり、別途予測されている将来の経済成長率をあてはめて、将来の燃料消費量( $P$ )を計算することも可能である。ちなみに、1990年～2000年で見ると、OECD諸国のGDPは約3%/年でほぼ直線的に増加しており、一方船舶の燃料消費量( $P$ )は約5%/年でやはり増加している。

しかしながら、1.2.4に示したように、その輸送エネルギー効率( $RT_{ijk}$ )に最も影響する燃料消費率( $C_{ijk}$ )は船種、船型、船齢カテゴリーによって大きく異なる。つまり、輸送総量が同じであっても、船種、船型、船齢の偏在などの要素があれば、燃料消費量は影響を受けることになる。

同様に、近年のバルカーの専用船化や、コンテナ輸送比率の増大など輸送形態の変化を考えると、航路ごとに貨物量( $TN$ )の年増加量は異なる可能性が高い。つまり、世界規模で貨物量全体に一律の増加率を当てはめることには無理があると考えられる。

従って、前述のように単純に経済成長率を使った推定では船舶の代替の効果などを定量的に解析することができない。すなわち、燃料消費量の将来予測には、少なくとも船種毎の輸送総量( $TR_i$ )の将来予測と、船種、船型、船齢ごとの輸送容量( $TC_{ijk}$ )の将来予測が不可欠であると考えられる。

ここで、輸送総量( $TR_i$ )と輸送容量( $TC_{ijk}$ )の定義を再掲する。

$TR_j$  : 輸送総量 ; 船種 $i$ に属する船舶が輸送した年間輸送総量。単位はタンカー・バルカーではDWT/年、コンテナ船ではTEU/年。

$TC_{ijk}$  : 船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ に属する船舶の輸送容量。単位はタンカー・バルカーではDWT、コンテナ船ではTEU。

本調査では船種をタンカー、バルカー及びコンテナ船の3カテゴリーに分け、ウェットバルクはタンカーが、全てのドライバルクはバルカーが、コンテナ貨物はコンテナ船が、おのおの輸送するものとした。以下、4.1.1ではタンカー及びバルカーの輸送総量( $TR_i$ )及び輸送容量( $TC_{ijk}$ )の将来予測を、4.1.2ではコンテナ船の輸送総量( $TR$ )及び輸送容量( $TC_{jk}$ )の将来予測を行った。

なお、船種毎の輸送総量及び輸送容量の予測の際には、造船業基盤整備事業協会<sup>13</sup>資料(以下、

<sup>13</sup> 同協会は2001年4月から運輸施設整備事業団に統合された

基盤協(2000)<sup>14</sup>と略)を参考にした。これは、2000～2010年を対象に発地 - 着地別の貨物量の予測と建造需要量の予測を行ったものであり、2000年10月に開催された国際海事機関(IMO)の海洋環境保護委員会(MEPC)の第45回会合において、ダブルハル化を実施した場合の船腹需給量等に関して日本国から提出された分析レポート(MEPC45/INF30)のベースとなった資料である。ただし、2011年以降の予測は、同資料の手法を参考にしてシップ・アンド・オーシャン財団が独自に行ったものである。

なお、平成11年度の調査においては輸送総量の伸びについては、近接5年のトンマイル量のトレンドを直線近似した傾きを年増加量とした。輸送総量の将来予測については様々な不確定要素があることから、以下の将来予測には基盤協(2000)をもとにした推定値を平成11年度の将来予測数値と併記して取り扱うこととした。

#### 4.1.1 タンカー及びバルカーの輸送総量ならびに輸送容量の予測

基盤協(2000)には、船種ごとに輸送容量( $TC_{ijk}$ )の将来予測結果が示されており、その予測の主なパラメータとして、タンカー及びバルカーの将来貨物量( $TN_i$ :トン/年)が別途予測されている。この将来予測値は地域のGDPの伸び及び地域間の貿易量などから算出されたものである。

ただし、本調査の予測計算では貨物量( $TN_i$ :トン/年)に輸送距離を乗じた輸送総量( $TR$ :トンマイル/年)が必要となる。また、輸送容量( $TC_{ijk}$ )についても年間の建造量だけでなく船型別の解撤量が計算に必要となる。以下に輸送総量( $TR_i$ )及び輸送容量( $TC_{ijk}$ )の予測方法及びその結果について示した。

##### (1) 輸送総量の予測

船種( $i$ )の輸送総量( $TR_i$ )は次式で定義され、先に述べたように基盤協(2000)のタンカー及びバルカーの総貨物量( $TN_i$ :トン/年)より算出した。

$$TR_{im} = TN_{imp} \times D_p$$

$TR_{im}$  :  $m$ 年における船種 $i$ の輸送総量(トンマイル/年)  
 $TN_{imp}$  :  $m$ 年における船種 $i$ 、航路 $p$ の貨物量(トン/年)  
 $D_p$  : 航路 $p$ のマイル数

##### 貨物量の将来予測

表 4.1-1に基盤協(2000)の関連資料が推定した荷種ごとの貨物量( $TN_i$ )の2000～2010年までの将来予測を示した(表中 upper case)。

2011～2020年の船種ごとの貨物量( $TN_i$ )については、2000～2010年まで11年間の増加傾向が2011年以降も継続すると仮定し、2010年までのデータを直線近似して、その傾きを年増加量とした。2011年以降の荷種別貨物量( $TN_{im}$ )の年増加量は表 4.1-2に示すとおり

<sup>14</sup> 造船業基盤整備事業協会 (2000) 「EU提案に基づきダブルハル化を実施した時の船腹需給量等に関する調査」

りである。また、参考として当該年増加量の 1997 年貨物量に対する比率を同表中に示した。荷種によってその数値にはばらつきがあるものの、IMF および世界銀行<sup>15</sup>による 2000 年代前半の世界経済成長率(2%強)にほぼ近い数値である。

なお、タンカーについては平成 11 年度調査で用いた貨物量予測(lower case)を、基盤協(2000)で用いた貨物量予測(upper case)と併記する形で本書では掲げた。平成 11 年度の将来予測においては、1997 年貨物量の 1.0%に相当する年増加量(原油  $17.7 \times 10^6$  トン/年、石油製品  $5.2 \times 10^6$  トン/年)を用いている。これは、過去の 5 年間における年平均増加率に相当するものである。

バルカーについては、過去 5 年間のトレンドと基盤協(2000)による将来予測の数値に大きな差異がないことなどから、当該予測値のみを用いた。

---

<sup>15</sup> IMF(2001), World Economic Outlook”および世界銀行(2000), World Development Indicators

表 4.1-1 船種別貨物量(TN<sub>i</sub>)の将来予測

単位:10<sup>6</sup>トン/年

年	タンカー						バルカー						総計	
	lower case			upper case			low/upper case						lower case	upper case
	原油	石油製品	小計	原油	石油製品	小計	鉄鉱石	石炭	穀物	ボーキサイト・アルミ	リン鉱石	小計		
1997	1,773	515	2,288	1,773	515	2,288	432	461	167	54	31	1,145	3,433	3,433
1998	1,779	505	2,284	1,779	505	2,284	420	472	164	53	31	1,140	3,424	3,424
1999	1,755	496	2,251	1,755	496	2,251	408	487	172	56	29	1,152	3,403	3,403
2000	1,773	501	2,274	1,832	501	2,333	447	505	179	59	31	1,221	3,495	3,554
2001	1,790	506	2,297	1,886	505	2,391	431	519	169	60	31	1,210	3,507	3,601
2002	1,808	511	2,320	1,936	508	2,444	432	549	175	62	30	1,248	3,568	3,692
2003	1,826	517	2,343	1,978	525	2,503	441	576	171	65	30	1,283	3,626	3,786
2004	1,844	522	2,365	2,014	548	2,562	443	592	174	67	30	1,306	3,671	3,868
2005	1,861	527	2,388	2,042	566	2,608	446	600	179	70	30	1,325	3,713	3,933
2006	1,879	532	2,411	2,073	582	2,655	439	606	188	70	30	1,333	3,744	3,988
2007	1,897	537	2,434	2,107	589	2,696	428	598	192	71	30	1,319	3,753	4,015
2008	1,915	542	2,457	2,143	584	2,727	435	602	201	72	30	1,340	3,797	4,067
2009	1,932	548	2,480	2,199	610	2,809	456	634	204	74	30	1,398	3,878	4,207
2010	1,950	553	2,503	2,250	636	2,886	464	653	207	76	30	1,430	3,933	4,316
2011	1,968	558	2,526	2,289	650	2,938	466	666	211	79	30	1,451	3,977	4,389
2012	1,985	563	2,548	2,328	663	2,991	467	679	215	82	30	1,472	4,020	4,463
2013	2,003	568	2,571	2,367	677	3,043	469	692	218	85	30	1,494	4,065	4,537
2014	2,021	573	2,594	2,406	690	3,096	470	705	222	88	30	1,515	4,109	4,611
2015	2,039	578	2,617	2,445	704	3,148	472	718	226	92	30	1,536	4,153	4,684
2016	2,056	584	2,640	2,483	717	3,200	473	730	230	95	29	1,557	4,197	4,757
2017	2,074	589	2,663	2,522	731	3,253	475	743	234	98	29	1,578	4,241	4,831
2018	2,092	594	2,686	2,561	744	3,305	476	756	237	101	29	1,600	4,286	4,905
2019	2,110	599	2,709	2,600	758	3,358	478	769	241	104	29	1,621	4,330	4,979
2020	2,127	604	2,731	2,639	771	3,410	479	782	245	107	29	1,642	4,373	5,052

小数点以下四捨五入

予測値は2000年以降。1999年までは、実績値。

出典:造船業基盤整備事業協会(2000)「EU提案に基づきダブルハル化を実施した時の船腹需給量等に関する調査」関連資料。ただし、ハッチング部は別途設定した伸び率による数値。

表 4.1-2 2011~2020年の荷種別貨物量(TN<sub>i</sub>)の予測に用いた年増加量

case	荷種	年増加量 (10 <sup>6</sup> トン/年)	年増加率 (%)
lower case	原油	17.7	1.0
	石油製品	5.2	1.0
	鉄鉱石	1.5	0.3
	石炭	12.9	2.8
	穀物	3.8	2.3
	ボーキサイト・アルミ	1.7	3.1
	リン鉱石	-0.1	-0.3
upper case	原油	38.9	2.2
	石油製品	13.5	2.6
	鉄鉱石	1.5	0.3
	石炭	12.9	2.8
	穀物	3.8	2.3
	ボーキサイト・アルミ	1.7	3.1
	リン鉱石	-0.1	-0.3

小数点第二位以下四捨五入

年増加率は、年増加量の1997年の貨物量に対する比率を示す。

バルカー貨物(鉄鉱石、石炭、穀物、ボーキサイト・アルミ及びリン鉱石)は lower case、upper case と同値。

## 輸送総量の将来予測

次式を用いて表 4.1-1に示した各年の貨物量( $TN_{im}$ )を輸送総量( $TR_{im}$ )に換算した。

$$TR_{im} = \sum (TN_{imp} \times D_p)$$

$TR_{im}$  :  $m$ 年における船種 $i$ の輸送総量

$TN_{imp}$  :  $m$ 年における船種 $i$ 、航路 $p$ の貨物量

$D_p$  : 航路 $p$ のマイル数

貨物量から輸送総量への換算に用いた航路ごとのマイル数( $D_p$ )は、海事産業研究所が整備した資料及び Fearnleys(1999a)<sup>16</sup>から作成した。 $TN$ の航路区分は、例えば東アジア地域間など必ずしも国を基点としたものではない。そのため、ここで設定したマイル数を適用することの妥当性を検証するため、1997年について本計算で求めた輸送総量と、別途 Fearnleys(1998) が集計している輸送総量の値を表 4.1-3で比較した。これによると、荷種により多少のばらつきはあるが、全体としてほぼ同程度であり、将来のトンマイルベースの輸送総量も同様の手順で予測することは適当であると考えられた。

2010年以降は貨物量の予測と同様に、2000～2010年までの11年間の荷種ごとの輸送総量( $TR_{im}$ )増加傾向(表 4.1-4)が2011年以降も継続すると仮定した。つまり、2000～2010年の11年間の輸送総量を直線近似し、その傾きを年増加量とした(表 4.1-5)。

船種ごとの輸送総量の将来予測の結果を図 4.1-1にまとめて示した。

表 4.1-3 荷種ごとの輸送総量( $TR_i$ )の推定値と統計値の比較(1997年)

荷種	推定値* ( $10^9$ トンマイル)	統計値** ( $10^9$ トンマイル)
原油	7,677	9,321
鉄鉱石	2,444	2,520
石炭	2,332	2,359
穀物	1,169	956
ポ-サイト・アルミ	206	282
リン鉱石	133	127
石油製品	2,050	2,289

\*) 造船業基盤整備事業協会(2000)で使用されたトンベースの実績値に発地 - 着地別にマイル数を乗じて求めた。発地 - 着地別のマイル数は、海事産業研究所が整備した資料、Fearnleys「World Bulk Trade (1999)」等より作成。

\*\*) 統計値は、Fearnleys「世界バルク貨物輸送」より引用。

<sup>16</sup> Fearnleys(1999a)「世界バルク貨物輸送」

表 4.1-4 船種ごとの輸送総量( $TR_i$ )の将来予測

単位:10<sup>9</sup>トンマイル

年	タンカー						バルカー						総計	
	lower case			upper case			lower/upper case						lower case	upper case
	原油	石油製品	小計	原油	石油製品	小計	鉄鉱石	石炭	穀物	ホークサイト・アルミ	リン鉱石	小計		
1997	9,321	2,289	11,610	9,321	2,289	11,610	2,520	2,359	956	282	127	6,244	17,854	17,854
1998	9,353	2,245	11,597	9,353	2,245	11,597	2,450	2,415	939	277	127	6,208	17,805	17,805
1999	9,226	2,205	11,431	9,226	2,205	11,431	2,380	2,492	985	292	119	6,268	17,699	17,699
2000	9,319	2,228	11,547	9,631	2,227	11,858	2,608	2,584	1,025	308	127	6,651	18,198	18,509
2001	9,412	2,251	11,663	9,915	2,245	12,160	2,514	2,656	967	313	127	6,578	18,241	18,738
2002	9,506	2,274	11,779	10,178	2,258	12,436	2,520	2,809	1,002	324	123	6,778	18,557	19,214
2003	9,599	2,297	11,895	10,399	2,333	12,732	2,573	2,947	979	339	123	6,961	18,856	19,693
2004	9,692	2,319	12,012	10,588	2,436	13,024	2,584	3,029	996	350	123	7,082	19,094	20,106
2005	9,785	2,342	12,128	10,735	2,516	13,251	2,602	3,070	1,025	366	123	7,185	19,313	20,436
2006	9,878	2,365	12,244	10,898	2,587	13,485	2,561	3,101	1,076	366	123	7,226	19,470	20,711
2007	9,972	2,388	12,360	11,077	2,618	13,695	2,497	3,060	1,099	371	123	7,150	19,510	20,845
2008	10,065	2,411	12,476	11,266	2,596	13,862	2,538	3,081	1,151	376	123	7,268	19,744	21,130
2009	10,158	2,434	12,592	11,561	2,711	14,272	2,660	3,244	1,168	386	123	7,581	20,173	21,853
2010	10,251	2,457	12,708	11,829	2,827	14,655	2,707	3,341	1,185	397	123	7,753	20,461	22,408
2011	10,345	2,480	12,824	12,033	2,887	14,920	2,715	3,407	1,207	406	123	7,858	20,682	22,778
2012	10,438	2,503	12,940	12,238	2,947	15,185	2,724	3,473	1,228	415	122	7,962	20,902	23,147
2013	10,531	2,525	13,056	12,442	3,007	15,449	2,733	3,539	1,250	423	122	8,067	21,123	23,516
2014	10,624	2,548	13,173	12,647	3,067	15,714	2,741	3,605	1,271	432	122	8,172	21,345	23,886
2015	10,717	2,571	13,289	12,851	3,127	15,978	2,750	3,671	1,293	441	121	8,276	21,565	24,254
2016	10,811	2,594	13,405	13,056	3,187	16,243	2,759	3,737	1,314	450	121	8,381	21,786	24,624
2017	10,904	2,617	13,521	13,261	3,247	16,507	2,768	3,803	1,336	459	121	8,486	22,007	24,993
2018	10,997	2,640	13,637	13,465	3,307	16,772	2,776	3,869	1,357	468	120	8,590	22,227	25,362
2019	11,090	2,663	13,753	13,670	3,367	17,036	2,785	3,935	1,379	476	120	8,695	22,448	25,731
2020	11,183	2,686	13,869	13,874	3,427	17,301	2,794	4,001	1,400	485	120	8,799	22,668	26,100

小数点以下四捨五入

基盤協(2000)で使用されたトンベースの実績値(1999年まで)及び予測値(2000年以降)に発地 - 着地別にマイル数を乗じて求めた。発地 - 着地別のマイル数は、海事産業研究所が整備した資料、Fearnleys「World Bulk Trade (1999)」等より作成。

表 4.1-5 2011～2020年の船種ごとの輸送総量( $TR_i$ )予測に用いた年増加量

case	荷種	年増加量 (10 <sup>9</sup> トンマイル/年)	年増加率 (%)
lower case	原油	93.2	1.0
	石油製品	22.9	1.0
	鉄鉱石	8.7	0.3
	石炭	65.9	2.8
	穀物	21.5	2.3
	ホークサイト・アルミ	8.8	3.1
	リン鉱石	-0.3	-0.3
upper case	原油	204.6	2.2
	石油製品	60.0	2.6
	鉄鉱石	8.7	0.3
	石炭	65.9	2.8
	穀物	21.5	2.3
	ホークサイト・アルミ	8.8	3.1
	リン鉱石	-0.3	-0.3

小数点第二位以下四捨五入。

年増加率は、年増加量の1997年の輸送総量に対する比率を示す。バルカー貨物(鉄鉱石、石炭、穀物、ホークサイト・アルミ及びリン鉱石)は lower case、upper case と同値。

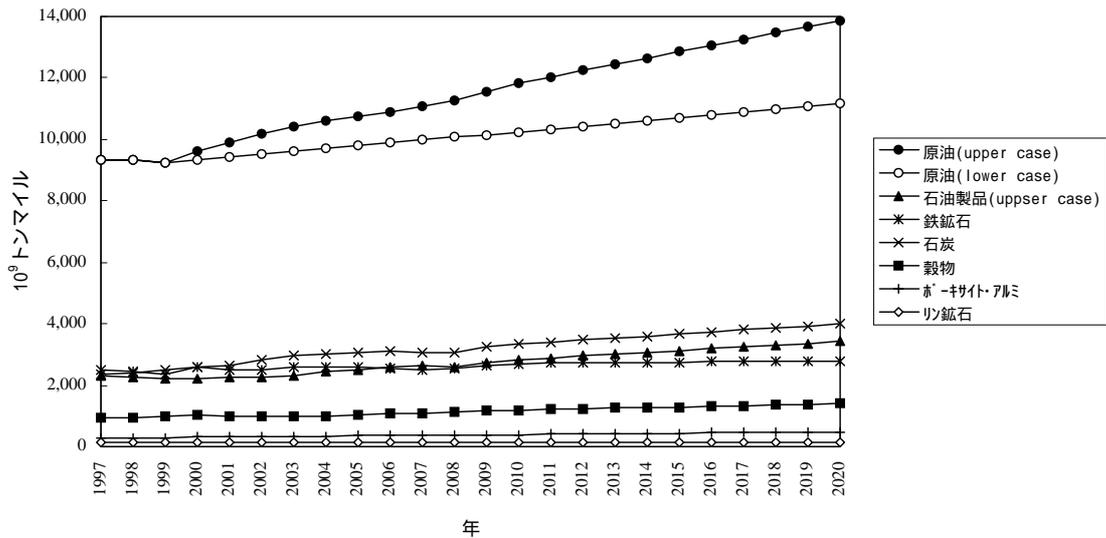


図 4.1-1 荷種別年間輸送総量( $TR_i$ )の将来予測(その1)

1997～1999年：年間輸送総量の実績値<sup>1</sup>に発地-着地別のマイル数<sup>2</sup>を乗じて算出（図中A）

2000～2010年：年間輸送総量の予測値<sup>1</sup>に発地-着地別のマイル数<sup>2</sup>を乗じて算出（図中B）

2011～2020年：2000～2010年と同じ傾向（表 4.1-5参照）が継続すると仮定し、年増加量(トンマイル/年)を一定として直線的に増減するものとした（図中C）。

1 基盤協(2000)より引用。

2 海事産業研究所資料、Fearnleys World Bulk Trade(1999a, b)等より作成。

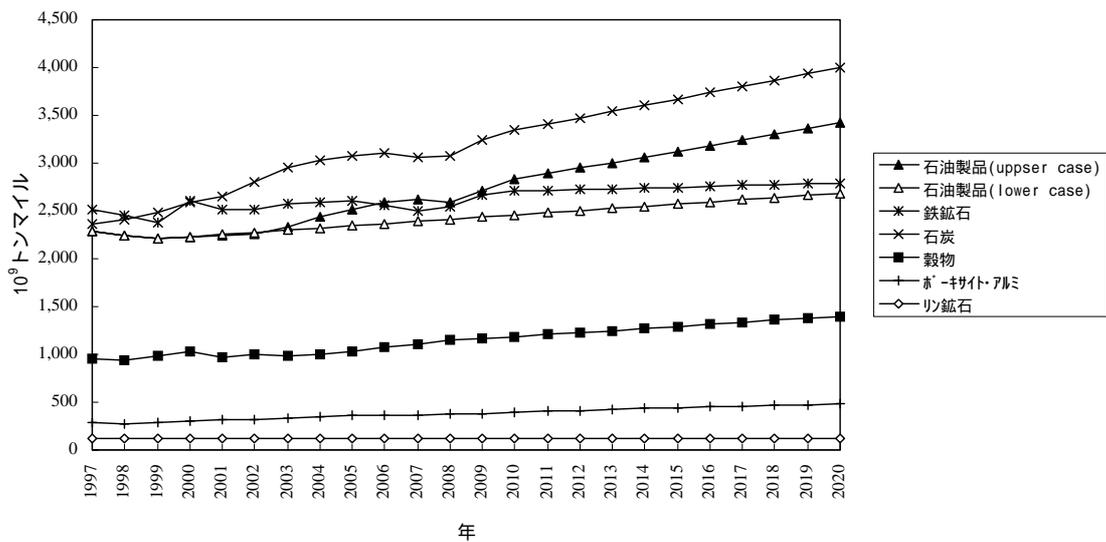


図 4.1-1 荷種別年間輸送総量( $TR_i$ )の将来予測(その2)

前図から原油を除いて図示したもの。

## (2) 輸送容量の予測

タンカー及びバルカーの輸送容量( $TC_{ijk}$ )は、輸送総量に応じて増加するものとした。タンカーの輸送容量を upper case について表 4.1-6に lower case について表 4.1-7に、バルカーの輸送容量を表 4.1-8に示した。詳しい推定方法については付録 2.1 を参照されたい。

表 4.1-6 タンカーの輸送容量( $TC_{jm}$ )の予測結果 (upper case)単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型区分	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
10-25	6.73	6.36	5.99	5.62	5.23	4.85	4.47	4.13	3.80	3.50	3.22	2.96
25-50	32.51	32.72	33.84	33.89	33.51	32.59	31.64	31.22	31.09	31.09	31.31	31.72
50-60	6.68	6.29	7.50	8.35	8.93	9.14	9.33	9.65	10.06	10.48	10.85	11.33
60-80	13.36	12.58	13.61	14.19	14.42	14.13	13.89	13.90	14.10	14.29	14.26	14.28
80-120	49.95	50.47	52.9	54.07	54.41	53.43	52.67	53.01	53.94	54.86	55.18	55.59
120-200	42.37	42.67	43.39	44.16	45.76	47.92	49.12	49.78	49.87	49.64	49.95	50.73
200+	126.89	128.33	129.65	129.96	132.02	135.20	136.60	138.02	140.96	142.60	144.55	149.09
合計	278.50	279.42	286.89	290.24	294.29	297.26	297.73	299.71	303.83	306.46	309.32	315.70

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型区分	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
10-25	2.73	2.52	2.32	2.13	1.97	1.85	1.75	1.67	1.59	1.51	1.46	1.41
25-50	32.28	32.81	32.83	32.89	33.07	33.45	33.88	34.33	34.81	35.34	35.78	36.20
50-60	11.95	12.58	12.94	13.34	13.82	14.46	15.14	15.86	16.60	17.38	18.14	18.82
60-80	14.52	14.91	15.00	15.16	15.41	15.88	16.40	16.99	17.61	18.28	18.97	19.59
80-120	56.53	57.69	57.78	57.9	58.14	58.55	59.01	59.47	59.97	60.56	61.02	61.42
120-200	51.98	53.10	54.24	55.46	56.69	57.83	58.70	59.37	59.89	60.43	60.69	61.10
200+	156.29	162.58	166.83	171.06	175.46	180.09	183.30	186.39	189.42	192.75	195.63	198.88
合計	326.28	336.18	341.93	347.95	354.56	362.11	368.18	374.07	379.89	386.25	391.68	397.42

船型区分の単位は10<sup>3</sup>DWT。表中の輸送容量( $TC$ )の予測値の単位は10<sup>6</sup>DWT。輸送容量( $TC_{m+i}$ )は、前年の輸送容量( $TC_m$ )に必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。表 4.1-7 タンカーの輸送容量( $TC_{jm}$ )の予測結果 (lower case)単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型区分	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
10-25	6.73	6.36	5.99	5.62	5.23	4.85	4.19	3.44	2.81	2.36	2.05	1.83
25-50	32.51	32.72	33.84	33.89	33.41	32.61	31.37	30.30	29.53	29.01	28.82	28.61
50-60	6.68	6.29	7.50	8.35	8.87	9.14	9.40	9.46	9.42	9.38	9.50	9.60
60-80	13.36	12.58	13.61	14.19	14.36	14.13	13.86	13.46	13.00	12.53	12.16	11.82
80-120	49.95	50.47	52.9	54.07	54.25	53.41	52.39	51.58	50.96	50.46	50.24	49.84
120-200	42.37	42.67	43.39	44.16	45.50	48.22	49.07	48.17	47.32	46.93	47.44	47.96
200+	126.89	128.33	129.65	129.96	131.30	135.94	136.51	134.80	134.84	135.31	137.49	140.26
合計	278.50	279.42	286.89	290.24	292.93	298.30	296.79	291.22	287.87	285.96	287.70	289.93

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型区分	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
10-25	1.70	1.57	1.44	1.33	1.24	1.21	1.19	1.16	1.14	1.10	1.04	0.98
25-50	28.37	28.17	27.92	27.73	28.07	28.47	28.86	29.22	29.55	29.73	29.73	29.75
50-60	9.85	10.13	10.38	10.67	11.28	11.93	12.58	13.25	13.91	14.49	15.12	15.68
60-80	11.81	11.88	11.92	12.01	12.42	12.92	13.44	13.98	14.54	15.01	15.62	16.15
80-120	49.61	49.53	49.23	48.94	49.5	49.53	49.59	49.68	49.77	49.65	49.72	49.72
120-200	48.45	48.91	49.71	50.59	52.11	51.87	51.62	51.36	51.09	50.69	50.96	51.28
200+	143.16	145.85	148.62	151.41	156.71	158.22	159.70	161.17	162.65	163.54	165.30	167.20
合計	292.94	296.03	299.22	302.67	311.33	314.16	316.98	319.81	322.65	324.23	327.49	330.76

船型区分の単位は10<sup>3</sup>DWT。表中の輸送容量( $TC$ )の予測値の単位は10<sup>6</sup>DWT。輸送容量( $TC_{m+i}$ )は、前年の輸送容量( $TC_m$ )に必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。

表 4.1-8 バルカーの輸送容量( $TC_m$ )の予測結果

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型区分	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
10-25	22.19	21.19	21.03	20.71	20.28	19.66	19.34	19.41	19.44	19.48	19.72	20.13
25-50	86.56	83.70	84.98	85.62	85.76	85.07	85.21	86.55	87.47	88.17	89.30	90.70
50-60	61.71	60.63	63.76	66.41	68.78	70.16	71.21	72.39	72.67	72.08	72.80	75.63
60-80	3.52	3.40	3.41	3.42	3.45	3.43	3.36	3.36	3.35	3.31	3.31	3.46
80-100	3.22	3.04	3.03	3.04	3.08	3.05	2.96	2.95	2.95	2.91	2.90	3.07
100-120	64.58	63.80	63.11	62.34	61.51	60.45	59.20	57.92	56.51	54.92	53.24	51.69
120-200	9.55	8.90	12.68	16.58	20.68	23.51	25.35	27.89	30.23	31.63	33.22	37.05
200+	1.18	1.30	1.30	1.30	1.29	1.28	1.27	1.25	1.23	1.20	1.16	1.12
合計	252.51	245.97	253.30	259.41	264.83	266.62	267.91	271.72	273.84	273.69	275.65	282.85

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型区分	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
10-25	20.34	20.39	20.57	20.81	21.12	21.49	21.93	22.44	22.98	23.54	24.10	24.65
25-50	91.12	90.75	90.75	90.87	91.21	91.77	92.52	93.45	94.45	95.42	96.26	97.04
50-60	78.51	80.88	82.96	85.01	86.99	88.92	90.78	92.49	93.90	95.06	96.11	97.15
60-80	3.65	3.78	3.89	3.99	4.09	4.18	4.28	4.38	4.47	4.55	4.63	4.71
80-100	3.30	3.49	3.65	3.83	4.02	4.23	4.44	4.66	4.90	5.13	5.35	5.56
100-120	50.08	48.24	46.22	44.06	41.76	39.29	36.69	34.02	31.31	28.66	26.18	24.00
120-200	41.50	44.99	48.12	51.26	54.45	57.74	61.14	64.68	68.32	71.93	75.33	78.44
200+	1.07	1.02	0.97	0.91	0.86	0.79	0.72	0.65	0.58	0.51	0.44	0.38
合計	289.59	293.54	297.13	300.75	304.49	308.41	312.50	316.77	320.91	324.79	328.41	331.94

船型区分の単位は 10<sup>3</sup>DWT。表中の輸送容量( $TC$ )の予測値の単位は 10<sup>6</sup>DWT。

輸送容量( $TC_{m+1}$ )は、前年の輸送容量( $TC_m$ )に必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。

バルカーでは、upper case、lower case と同一の値を用いた。

#### 4.1.2 コンテナ船の輸送総量及び輸送容量の予測

コンテナ船の輸送総量( $TR$ )及び輸送容量( $TC_{ijk}$ )の予測には、バルカー及びタンカー(4.1.1)と同様の考え方をを用いた。

##### (1) 輸送総量の予測

###### 貨物量の将来予測

一般にコンテナの貨物量( $TN_i$ )は世界の GDP に比例すると仮定することが多い。基盤協(2000)も同様の手法を用いており、世銀の長期観測による OECD 諸国の 2000 年～2005 年の平均的な GDP の伸び(2.8%/年)を用いて建造需要量の予測を行っている。本調査においても、lower case については 1997 年の貨物量( $TN_i$ ) =  $49,000 \times 10^3$  TEU(1.2.2 参照)の 2.8%分である  $1,400 \times 10^3$  TEU/年を年増加量とすることとした。また、upper case として、平成 11 年度の調査と同様に 1997 年の貨物量( $TN_i$ ) =  $49,000 \times 10^3$  TEU(1.2.2 参照)の 6.0%分である( $2,940 \times 10^3$  TEU/年)を年増加量とすることとした。この増加量は過去 5 年のコンテナ取扱量(TEU/年)の平均的な増加量でもある。

###### 輸送総量の将来予測

航路( $p$ )ごとの輸送距離( $D_p$ )が将来にわたり変化しない場合、輸送総量( $TR$ )は貨物量( $TN_i$ )に単純に比例することになる。よって、ここでは lower case として表 1.2-4 に示した 1997 年の輸送総量( $TR_i$ ) =  $352,000 \times 10^6$  TEU マイルの 2.8%分である  $9,900 \times 10^6$  TEU マイル/年を年増加量として用いることとした。また、upper case として、1997 年の輸送総量( $TR_i$ ) =  $352,000 \times 10^6$  TEU マイルの 6.0%分である  $21,120 \times 10^6$  TEU マイル/年を年増加量として用いることとした。

最近では、大型ハブ港にコンテナが集中する傾向があり、特に域内の貨物量( $TN_p$ )の動きが変化することによって平均輸送マイルが変わったり、大型ハブ港の移行などで地域間の平均輸送距離にも変化が生じる可能性がある。

しかし、これらの点について将来にわたり予測するには定量的な情報が不十分であったため、航路ごとの平均輸送距離は将来にわたって変化しないと仮定した。

コンテナ船の貨物量( $TN_i$ )及び輸送総量( $TR$ )の将来予測を表 4.1-9に、2011～2020 年のコンテナ船の予測に用いた貨物量( $TN_i$ )及び輸送総量( $TR$ )の年増加率を表 4.1-10に、それぞれ示した。

表 4.1-9 コンテナ船の貨物量( $TN_i$ )及び輸送総量( $TR$ )の将来予測

年	総貨物量( $TN_i$ ) ( $10^3$ TEU/年)		輸送総量( $TR$ ) ( $10^6$ TEU マイル/年)	
	lower case	upper case	lower case	upper case
1997	49,000	49,000	352,000	352,000
1998	50,372	51,940	361,856	373,120
1999	51,744	54,880	371,712	394,240
2000	53,116	57,820	381,568	415,360
2,001	54,488	60,760	391,424	436,480
2002	55,860	63,700	401,280	457,600
2003	57,232	66,640	411,136	478,720
2004	58,604	69,580	420,992	499,840
2005	59,976	72,520	430,848	520,960
2006	61,348	75,460	440,704	542,080
2007	62,720	78,400	450,560	563,200
2008	64,092	81,340	460,416	584,320
2009	65,464	84,280	470,272	605,440
2010	66,836	87,220	480,128	626,560
2011	68,208	90,160	489,984	647,680
2012	69,580	93,100	499,840	668,800
2013	70,952	96,040	509,696	689,920
2014	72,324	98,980	519,552	711,040
2015	73,696	101,920	529,408	732,160
2016	75,068	104,860	539,264	753,280
2017	76,440	107,800	549,120	774,400
2018	77,812	110,740	558,976	795,520
2019	79,184	113,680	568,832	816,640
2020	80,556	116,620	578,688	837,760

表 4.1-10 2011～2020年のコンテナ船の総貨物量( $TN_i$ )及び輸送総量( $TR$ )

単位:総貨物量: $10^3$ TEU/年  
輸送総量: $10^6$ TEU マイル/年

	case	年増加量	年増加率(%)
総貨物量( $TN_i$ )	lower case	1,372	2.8
	upper case	2,940	6.0
輸送総量( $TR$ )	lower case	9,856	2.8
	upper case	21,120	6.0

小数点第二位以下四捨五入

年増加率は年増加量の1997年の総貨物量又は輸送総量に対する比率を示した。

(2) 輸送容量の予測

コンテナ船の輸送容量の予測結果を lower case、upper case をそれぞれ表 4.1-11及び表 4.1-12に示した。詳しい推定方法については、付録 2.2 を参照されたい。

なお表 4.1-11及び表 4.1-12の下段に1997年に対する2020年の輸送容量( $TC_j$ )の比率を示した。

表 4.1-11 コンテナ船の船型別輸送容量( $TC_{jm}$ )の予測結果(lower case)

単位:10<sup>3</sup>TEU

年	船型カテゴリー $j$ (TEU)						合計
	1000未満	1000～1999	2000～2999	3000～3999	4000～4499	4500以上	
1997	704	1,036	780	547	327	306	3,699
1998	725	1,100	865	600	361	321	3,973
1999	718	1,135	916	676	420	347	4,211
2000	687	1,113	920	690	433	353	4,195
2001	665	1,117	948	737	470	369	4,307
2002	643	1,122	975	783	508	386	4,418
2003	622	1,126	1,002	829	548	403	4,529
2004	601	1,131	1,027	873	587	421	4,640
2005	583	1,137	1,050	915	628	439	4,751
2006	568	1,145	1,072	955	668	456	4,863
2007	555	1,154	1,092	993	707	472	4,974
2008	544	1,165	1,112	1,031	745	487	5,085
2009	537	1,178	1,131	1,069	782	501	5,196
2010	531	1,192	1,149	1,106	818	512	5,308
2011	527	1,208	1,167	1,145	851	521	5,419
2012	525	1,225	1,186	1,184	883	527	5,530
2013	524	1,245	1,206	1,224	914	529	5,641
2014	525	1,266	1,227	1,265	943	528	5,753
2015	526	1,289	1,248	1,306	971	524	5,864
2016	528	1,313	1,269	1,348	999	517	5,975
2017	532	1,338	1,287	1,390	1,028	511	6,086
2018	537	1,363	1,302	1,433	1,057	506	6,198
2019	544	1,387	1,311	1,475	1,087	505	6,309
2020	553	1,410	1,314	1,517	1,118	508	6,420
2020/1997比 (%)	79%	136%	168%	277%	342%	166%	174%

船型カテゴリー $j$ の単位はTEU。表中の輸送容量( $TC$ )の予測値の単位は10<sup>3</sup>TEU。  
輸送容量( $TC_{m+i}$ )は、前年の輸送容量( $TC_m$ )に必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。

表 4.1-12 コンテナ船の船型別輸送容量( $TC_{jm}$ )の予測結果(upper case)

単位:10<sup>3</sup>TEU

年	船型カテゴリ-j (TEU)						合計
	1000未満	1000～1999	2000～2999	3000～3999	4000～4499	4500以上	
1997	704	1,036	780	547	327	306	3,699
1998	725	1,100	865	600	361	321	3,973
1999	718	1,135	916	676	420	347	4,211
2000	709	1,168	967	753	479	373	4,450
2001	699	1,200	1,019	831	540	400	4,688
2002	688	1,232	1,070	908	602	427	4,926
2003	677	1,264	1,120	985	664	455	5,165
2004	668	1,297	1,168	1,060	727	483	5,403
2005	661	1,331	1,215	1,133	791	510	5,641
2006	657	1,366	1,261	1,204	854	538	5,880
2007	655	1,403	1,305	1,274	917	565	6,118
2008	656	1,441	1,348	1,343	978	590	6,356
2009	659	1,482	1,390	1,412	1,039	614	6,595
2010	664	1,523	1,432	1,481	1,097	635	6,833
2011	672	1,567	1,474	1,550	1,154	654	7,072
2012	681	1,612	1,517	1,621	1,209	671	7,310
2013	691	1,659	1,560	1,692	1,263	683	7,548
2014	703	1,708	1,604	1,764	1,316	692	7,787
2015	715	1,759	1,649	1,836	1,368	698	8,025
2016	729	1,811	1,693	1,910	1,419	702	8,263
2017	744	1,863	1,735	1,983	1,470	706	8,502
2018	760	1,915	1,773	2,057	1,523	712	8,740
2019	778	1,967	1,806	2,130	1,576	721	8,979
2020	798	2,018	1,833	2,203	1,631	734	9,217
2020/1997比 (%)	113%	195%	235%	403%	499%	240%	249%

船型カテゴリ-jの単位はTEU。表中の輸送容量( $TC$ )の予測値の単位は10<sup>3</sup>TEU。  
 輸送容量( $TC_{m+1}$ )は、前年の輸送容量( $TC_m$ )に必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。

#### 4.2 燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量の将来予測

燃料消費量( $P$ )は、各カテゴリーの輸送総量(トンマイルまたはTEUマイル)と各カテゴリーの輸送エネルギー効率( $t\text{-Fuel}/\text{トンマイル}$ 、 $t\text{-Fuel}/\text{TEUマイル}$ )の積により求められる。

輸送エネルギー効率( $RT$ )を船種 $i$ 、船型 $j$ 別に船齢 $k$ に着目してみた場合、例えば、30年船齢のカテゴリーに対して5年船齢のカテゴリーは20～30%の向上がみられる。外航船の経済寿命はおよそ30年前後と自動車や航空機に比較して代替に要する期間が長い。そのため、高船齢船の代替は、全体の輸送エネルギー効率を向上させ、総燃料消費量を引き下げることにつながることが考えられる。高船齢船の代替は、バルカーでは40年、タンカー及びコンテナ船では35年で行われるものと仮定し、既にMARPOL条約で規則化(13G<sup>17</sup>)となったタンカーのフェーズアウトの効果は盛り込むこととした。

また、輸送エネルギー効率に大きく影響するものとして、減速航行、船型大型化、隻数の最適化等のオペレーション対応が考えられるが、その効果を定量的に予測することは困難である。よって将来予測においては、積荷率、運航速度といった運航上のパラメータについては不変であるものとして扱った。

燃料消費量の予測結果は、表 4.2-1、表 4.2-2及び図 4.2-1に示すとおりである。またCO<sub>2</sub>排出量の予測結果は、表 4.2-3、表 4.2-4および図 4.2-2に示す。

---

<sup>17</sup> MEPC46 での協議結果、海洋汚染防止(MARPOL)条約の13G規則の発効予定は2002年とされた。対象のシングルハルタンカー(MARPOL 船)は、原則25年船齢で順次フェーズアウトし、最終使用期限を2015年とされている。

表 4.2-1 燃料消費量の将来予測(lower case)

10<sup>6</sup> t-Fuel/年

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	33	34	36	37	39
1997比	0.0%	-6.6%	-4.5%	2.3%	4.2%	11.1%
バルカー	37	38	42	45	48	49
1997比	0.0%	3.6%	12.8%	21.0%	28.6%	33.2%
コンテナ船	45	51	55	60	67	74
1997比	0.0%	13.1%	21.9%	33.1%	47.9%	63.8%
不明分	7	8	8	9	9	10
1997比	0.0%	4.2%	11.1%	20.0%	28.7%	38.3%
合計	124	130	138	149	160	172
1997比	0.0%	4.2%	11.1%	20.0%	28.7%	38.3%

将来の総輸送容量(T)、輸送総量(TR)は、4.1で作成した値を用いた。

表 4.2-2 燃料消費量の将来予測(upper case)

10<sup>6</sup> t-Fuel/年

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	35	37	43	45	49
1997比	0.0%	-1.2%	5.5%	22.3%	27.3%	38.8%
バルカー	37	38	42	45	48	49
1997比	0.0%	3.6%	12.8%	21.0%	28.6%	33.2%
コンテナ船	45	61	68	80	92	105
1997比	0.0%	35.3%	51.3%	77.6%	105.4%	133.8%
不明分	7	9	8	11	11	13
1997比	0.0%	18.9%	7.8%	51.1%	54.4%	84.2%
合計	124	143	155	179	196	217
1997比	0.0%	14.6%	24.4%	43.6%	57.6%	74.2%

将来の総輸送容量(T)、輸送総量(TR)は、4.1で作成した値を用いた。

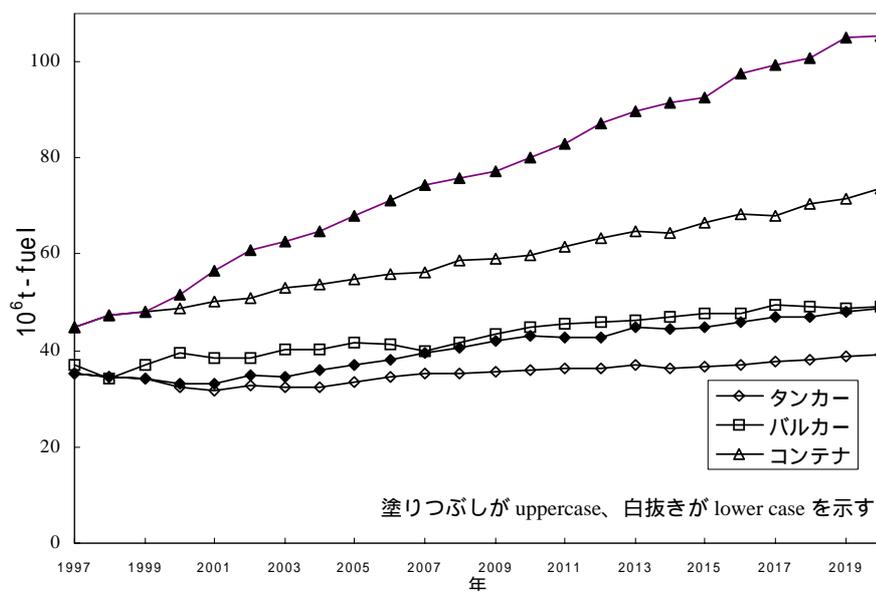


図 4.2-1 燃料消費量の将来予測

表 4.2-3 CO<sub>2</sub>排出量の将来予測(lower case)

		10 <sup>6</sup> t-Fuel/年				
年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	105	99	102	108	111	117
1997比	0.0%	-6.6%	-4.5%	2.3%	4.2%	11.1%
バルカー	111	114	126	135	144	147
1997比	0.0%	3.6%	12.8%	21.0%	28.6%	33.2%
コンテナ船	135	153	165	180	201	222
1997比	0.0%	13.1%	21.9%	33.1%	47.9%	63.8%
不明分	21	24	24	27	27	30
1997比	0.0%	4.2%	11.1%	20.0%	28.7%	38.3%
合計	372	390	414	447	480	516
1997比	0.0%	4.2%	11.1%	20.0%	28.7%	38.3%

表 4.2-1の各燃料消費量にCO<sub>2</sub>排出係数2.999を乗じた

表 4.2-4 CO<sub>2</sub>排出量の将来予測(upper case)

		10 <sup>6</sup> t-Fuel/年				
年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	105	105	111	129	135	147
1997比	0.0%	-1.2%	5.5%	22.3%	27.3%	38.8%
バルカー	111	114	126	135	144	147
1997比	0.0%	3.6%	12.8%	21.0%	28.6%	33.2%
コンテナ船	135	183	204	240	276	315
1997比	0.0%	35.3%	51.3%	77.6%	105.4%	133.8%
不明分	21	27	24	33	33	39
1997比	0.0%	18.9%	7.8%	51.1%	54.4%	84.2%
合計	372	429	465	537	588	651
1997比	0.0%	14.6%	24.4%	43.6%	57.6%	74.2%

表 4.2-2の各燃料消費量にCO<sub>2</sub>排出係数2.999を乗じた

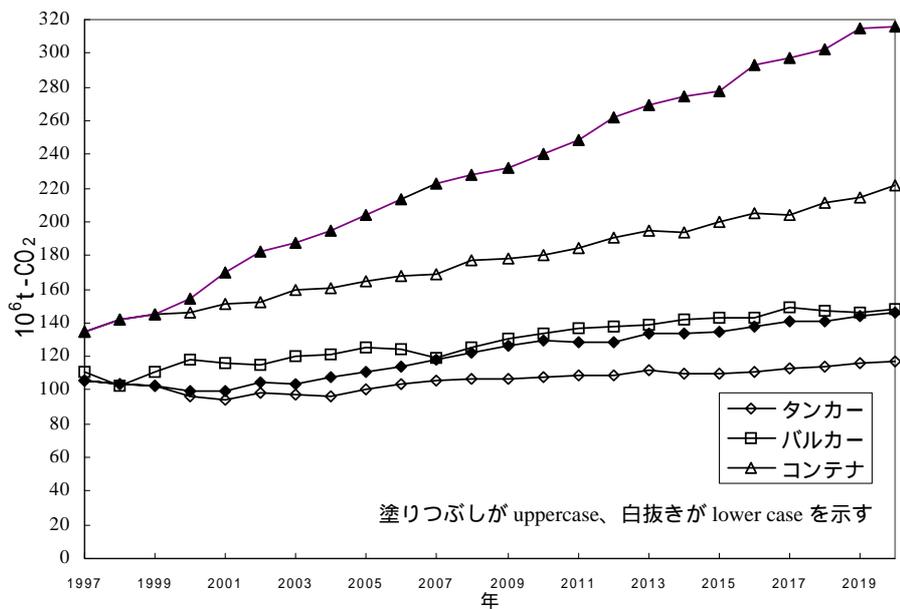


図 4.2-2 CO<sub>2</sub>排出量の将来予測

タンカーでは、現在高船齢船の占める割合が比較的高いため、2000年代前半に代替のピークがくる。このため、lower caseでは2000～2010年の間は輸送総量の伸びを上回る輸送エネルギー効率の向上がおり、1997年よりもタンカーの燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量は一時的に削減される。その後は代替効果が小さくなるため、長期的には燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量は増加に転ずる。upper caseの場合も同様の傾向はあるが、輸送総量の伸びが大きく、1997年を下回る期間はごく短い。

バルカー及びコンテナ船については、タンカーに見られるような高船齢船への分布の偏りがなく、輸送総量の伸びが高船齢船の代替に伴う輸送エネルギー効率の向上を常に上回るため、短期的にも、長期的にも、燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量は単調増加するものと予想された。

この結果、外航船舶全体の燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量は、lower caseで2010年で20%、2020年では38%、upper caseで2010年で44%、2020年では74%(いずれも対1997年比)の増加となるものと予測された。

2020年における1997年に対する燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量の伸びを船種別構成比で見ると、タンカーはlower caseでは11%、upper caseでは38%、バルカーは両caseとも33%、と1.5倍弱の伸びを示したのに対して、コンテナ船の2020年における1997年に対する燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量の伸びは、lower caseでは64%、upper caseでは134%と大きな伸びを示している。その結果、1997年時点ではタンカー、バルカー及びコンテナ船の排出構成比率は、それぞれ28%、30%、36%と各々1/3を占めていたのに対して、2000年ではlower caseにおいて各々23%、28%、43%を占め、upper caseでは各々23%、28%、48%を占め、コンテナ船からの排出量がおよそ半数を占めることが推定された。これはそれぞれのcaseともに、コンテナ貨物の輸送総量の増加割合が、他の貨物の増加割合より大きいためである。従って、コンテナ輸送に伴う燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量が、将来の削減のためには重要である。

## 5 外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの排出量削減対策に関する調査

### 5.1 CO<sub>2</sub>削減対策の評価とその実用性の調査

#### 5.1.1 船舶における輸送エネルギー効率の向上の歴史

外航船舶全体からのCO<sub>2</sub>排出量(t-CO<sub>2</sub>/年)は下式のとおり燃料消費量(P:t-Fuel/年)に比例するため、CO<sub>2</sub>排出量の削減は燃料消費量(P)の削減に他ならない。

$$EMCO_2 = P \times EFCO_2$$

ここで

$EMCO_2$  :燃料の燃焼により生じるCO<sub>2</sub>排出量(t-CO<sub>2</sub>/年)

$P$  :燃料消費量

$EFCO_2$  :排出係数;MFOの場合2,999 g-CO<sub>2</sub>/g-Fuel(1.4参照)

船舶輸送は、他の輸送機関と比較すると一度に大量の輸送ができる、つまりスケールメリットを持ちあわせた輸送手段である。運航経営上においても、燃料費はランニングコストの大半を占めているため、「輸送量あたりの燃料消費量」である輸送エネルギー効率(RT:タンカー・バルカーではt-Fuel/トンマイル、コンテナ船ではt-Fuel/TEUマイル)の改善は、コスト削減の対象としてこれまで多くの努力が払われてきた。

輸送エネルギー効率(RT)には「船舶の1隻あたり1日あたりの燃料消費量」である燃料消費率(C:t-Fuel/隻/日)以外に、運航速度、積荷率などの要素が影響する。輸送エネルギー効率(RT)の改善について過去20年のトレンドを振り返ると、燃料消費率の改善によるところが大きい。同じ船種・船型で比較した場合、過去20年間に燃料消費率はおよそ20～30%程度改善されてきた。

なお、LCA的観点から考えた場合、船の建造・解撤等の際の材料・燃料などに消費されるエネルギー由来のCO<sub>2</sub>排出量もあるが、この排出量は建造費の比較的高い原油タンカーやアルミ船体の漁船でも船の寿命全体におけるCO<sub>2</sub>排出量の2%弱にしか過ぎないという試算もある(亀山など,2000<sup>18</sup>)。従って、運航に伴い消費される燃料以外で生じるCO<sub>2</sub>排出量はここでは考慮しないこととした。

1970年代の石油ショックを契機に船舶運航の形態には大きな変化があった。

具体的には、船舶の大型化や専用船化による輸送単位の増加、荷役効率の改善、そして船舶単体の効率の改善が挙げられる。輸送単位の増加は、タンカー、鉄鉱石及び石炭など大規模輸送を必要とする荷種を対象に特に顕著であり、専用船化と船舶の超大型化が進んだ。

一方、荷役効率の改善はコンテナ輸送に代表される。ドアツードアの輸送形態は世界の流通形態を大きく変化させ、海運業の小口輸送に占めるコンテナ輸送の割合は大きな伸びを示した。今後も、ハブ港間の高密度な定期運航による平均積荷率の向上や40ftコンテナの陸上一貫輸送など、荷役効率の向上の余地は若干残されていると考えられる。

一方、プロペラの低回転数化に伴う推進効率の向上、機関の熱効率の高効率化、及び船

<sup>18</sup> 亀山など(2000)、船舶からのCO<sub>2</sub>排出に関するライフ・サイクル・インベントリ分析,第4回エコバランス国際会議講演集

型の改良の技術開発もこの20年間に進んでおり、船舶の輸送エネルギー効率の改善に大きく寄与している。

例えば、機関単体の燃料消費量(SFC)は、図 5.1-1に示すように1970年代と1990年代を比較した場合、150g/PSH程度から120 g/PSHへ、約20%程度改善した(ディレーティングを行った場合は25%程度の改善にあたる)。

これは、図 5.1-1に示す最大燃焼圧力の上昇、機関の低速化、静圧過給、ロングストローク化などによるものである。なお、同時に機関重量も軽減化が進み、船舶全体での輸送エネルギー効率改善に繋がっているものと考えられる。同様に4サイクルについても図 5.1-2に示すように機関熱効率の大幅な改善が見られた。

しかし、図 5.1-1及び図 5.1-2によれば、近年は4サイクル機関、2サイクル機関ともに熱効率の向上の傾向は停滞気味である。これには、燃料代の安定化傾向、NO<sub>x</sub>規制など熱効率優先の設計を見直さざるを得ない傾向、ユーザー側の輸送速度アップ志向を受けた同規模機関の出力アップ志向など複合的な要因が関与していると考えられる。一方では、仮に燃料単価が大幅に上昇するなどの、外的要因があれば、再び燃費重視の技術開発が促進される可能性もある。

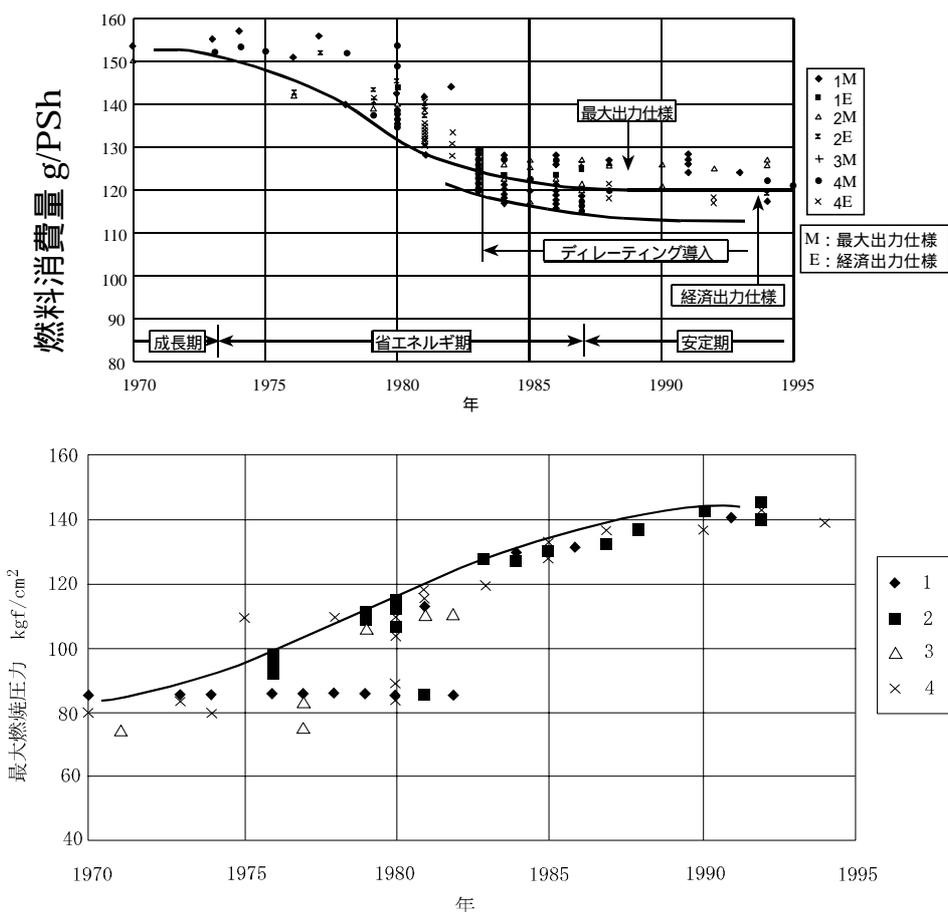
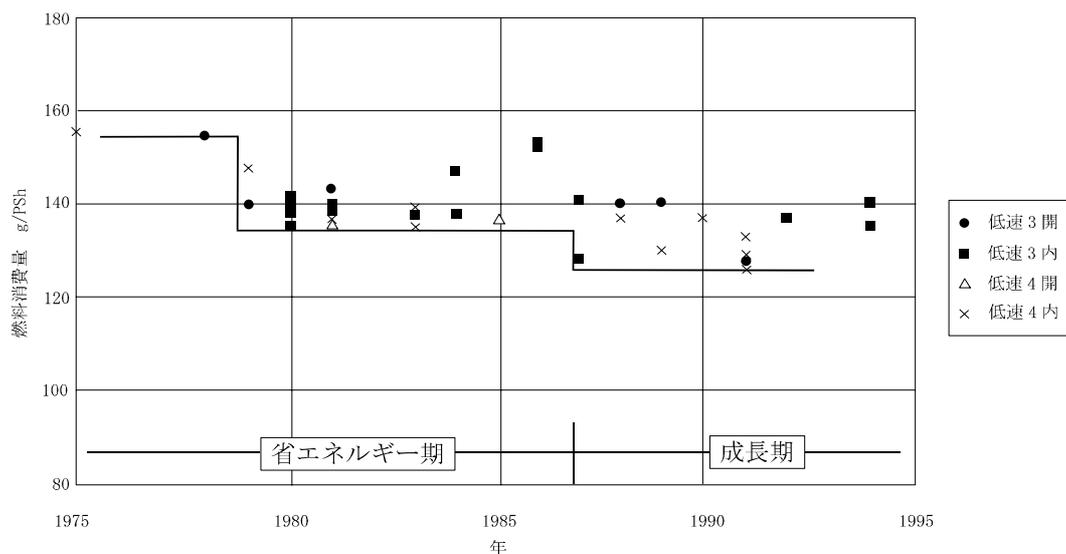


図 5.1-1 製造年代による2サイクル低速機関の燃料消費量の推移と最大燃焼圧力( $P_{max}$ )の推移

(社)日本造船研究協会(1998)、船用ディーゼル機関高性能化に関する研究開発成果活用に関する調査(機関部門)

### 燃料消費量の推移



### 最大燃焼圧力の推移

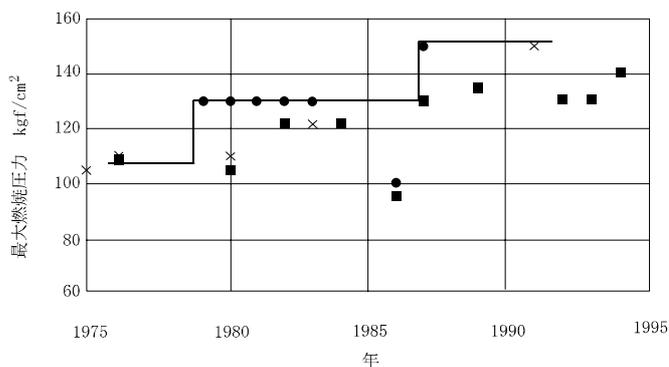


図 5.1-2 製造年代による4サイクル低速機関の燃料消費量の推移と最大燃焼圧力( $P_{max}$ )の推移

(社)日本造船研究協会(1998)、船用ディーゼル機関高性能化に関する研究開発成果活用に関する調査(機関部門)

船型の改良も輸送エネルギー効率の改善に貢献している。式1に示すように、 $\varepsilon_H$ は機関出力から推進エネルギーへの転換効率であり、船型性能の経済性を示す指標といえる(値が小さいほど経済性の高く燃料消費量の少ない船型)。

タンカーにおいては、図 5.1-3に示すように、 $\varepsilon_H$ は10万DWT以上の大型タンカーの方が2-10万DWTの小型タンカーよりも小さな値を示しており、タンカーの大型化により経済性の向上が図られていることがわかる。また、建造年による変化は、機関ほど大きくないが、大型タンカーでは15%程度改善がなされている。

一方、タンカー以外の船種においては近年悪化の傾向が見られ、特にコンテナ船で悪化傾向が大きい。これはコンテナ船では1980年代までに8%程度の改善が見られたが、その後搭載TEUの増加のため幅広の船型が使用されていること、また、オイルショック時に取られた減速措置が緩和され再び高速化が進んだことによるものと考えられる。なお、コンテナについては排水容積あるいはDWT当たりの積載可能TEUが建造年代ごとに向上している。

$$\varepsilon = H_0 \times SFC \times \varepsilon_H \quad (式 1)$$

$H_0$  : 燃料発熱量(kcal/kg-Fuel)

$SFC$  : 主機燃費(kg-Fuel/PSH)

$\varepsilon_H$  : 機関出力から推進エネルギーへの転換効率

$$\varepsilon_H = DHP / \Delta \times V \quad (式 2)$$

DHP : 伝達馬力(PS)

$\Delta$  : 排水重量トン(ton)

$V$  : 船速(knt)

$\nabla$  : 排水容積

(注) ○、△ : NK 登録船データ  
● : 関西造船協会誌等による補足データ

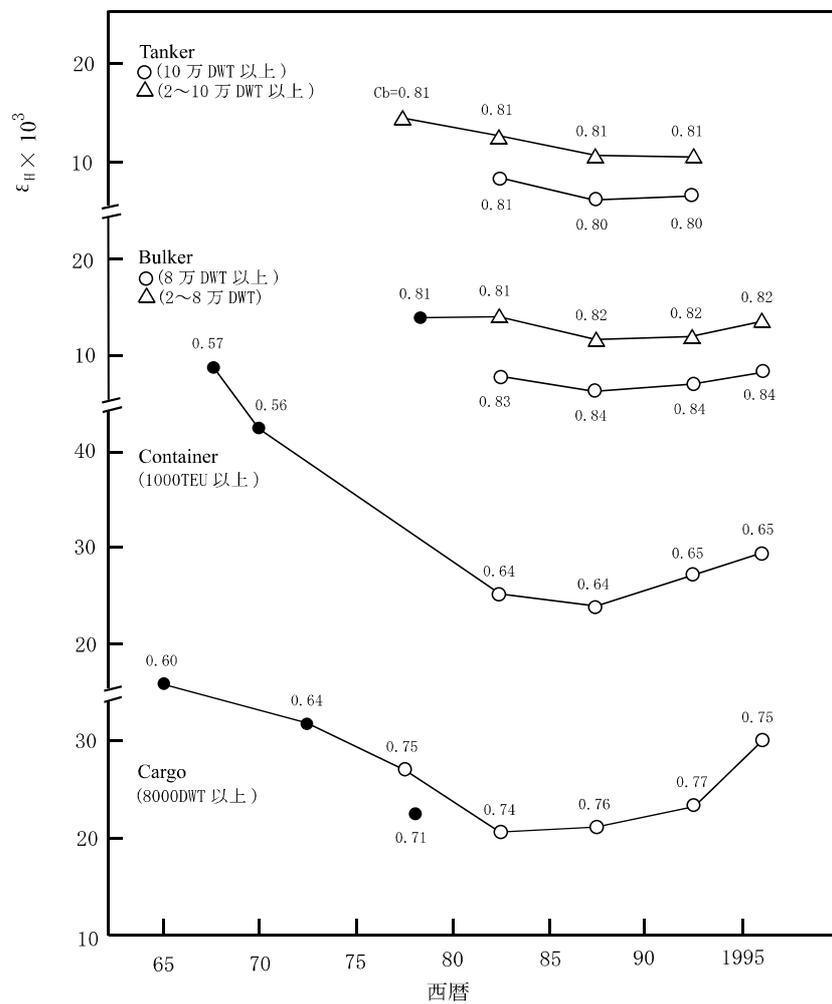


図 5.1-3 船種別のエネルギー転換効率

添字は Cb 値 : 満載排水量を垂線間長さと型幅、満載喫水で割った指数。  
(社)日本造船研究協会(1998)、船用ディーゼル機関高性能化に関する研究開発成果活用に関する調査(流力部門) より

### 5.1.2 他の輸送機関の輸送エネルギー効率との比較

ここでは、他の輸送機関との比較をすることで船舶の輸送エネルギー効率(RT)の特徴を把握した。

表 5.1-1は、日本国内における各交通機関の輸送トンキロ当たりのCO<sub>2</sub>排出量の比較を示したものである。内航船舶の値は国土交通省がまとめた内航船舶輸送統計年報の輸送総量と燃料消費量のアンケート調査結果より算出されたものである。内航海運の輸送エネルギー効率は、営業用トラックのそれと比較すると5分の1程度となっている。

図 5.1-4には、内航船舶明細書に記載の1日当たりの燃料消費量、航海速力及び積載重量から算出した輸送エネルギー効率を、内航海運において多くを占める499総トンクラス及びそれ以下の小型船舶について示した。表 5.1-1で示した値と比較するために、内航海運の輸送エネルギー効率39t-CO<sub>2</sub>/10<sup>6</sup>トンキロ(燃料1トン当たりのCO<sub>2</sub>発生量は2.999 kg-CO<sub>2</sub>/Fuelと用いた)を点線で示した。図中の各船舶の値は、空き荷航海、積荷率及び高船齢船の経年劣化などを考慮していないので、数値は実際の値より少なめに計算される可能性が高く、実際はこの2倍以上の値で運航されることが多いと推定される。従って表 5.1-1に示された内航海運の輸送エネルギー効率(39 × t-CO<sub>2</sub>/10<sup>6</sup>トンキロ)は、これら小型船舶の実航海時の値の影響を受けているものと考えられる。

表 5.1-1 各交通機関における輸送トンキロ当たりのエネルギー及びCO<sub>2</sub>排出量

	鉄道貨物	自家用 トラック貨物	営業用 トラック貨物	内航船舶	航空貨物
輸送トンキロ	22,920	65,028	235,642	226,980	984
トンキロ当たりのエネルギー使用量 (kj/トンキロ)	497	10,018	2,879	549	22,930
輸送エネルギー効率 (t-CO <sub>2</sub> /10 <sup>6</sup> トンキロ)	22	913	198	39	1,539

国土交通省(2000年)、交通関係エネルギー要覧より作成

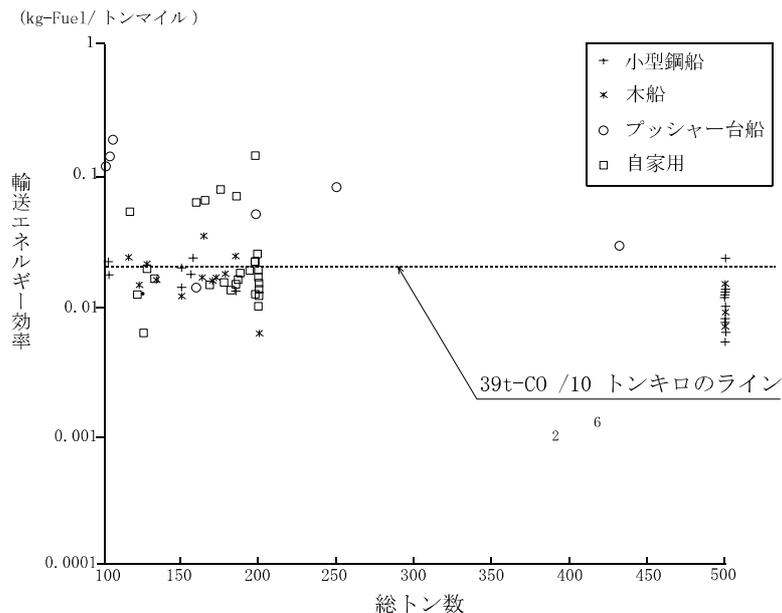


図 5.1-4 内航船舶明細書から算出した内航船の輸送エネルギー効率(RT)

船舶排ガスの環境への影響と防止技術の調査、シップ・アンド・オーシャン財団(1992)より作成。

次に外航船舶の輸送エネルギー効率の例を図 5.1-5に示した。同データは、図 5.1-4に示した内航船舶のデータとは異なり、運航業者へのアンケート調査によって得た輸送トンマイル、燃料消費量の実績値より算出されたものである。

外航海運では、自動車運搬船を除くと概ね0.005 kg-Fuel/トンマイル以下となっており、内航海運よりも輸送エネルギー効率は良くなっている。船種による違いをみると、タンカーが最も効率が良く、コンテナやPCC船(Pure Car Carrier)の輸送エネルギー効率に比較してはその数分の1程度であることがわかる。これは、タンカーが輸送する貨物が液体のため、たとえダブルハルであっても船倉内のデッドスペースが少なく、かつ経済運航速度(slow steaming)を行うなどで運航されることが多いことに対して、コンテナ船ではスケジュールを優先し、高速運航されている場合が多いことに加え比較的容積当たりの重量が軽い製品輸送の頻度が多いこと、PCC船は輸送される自動車の体積当たりの重量が軽く、復元性確保のため常時バラスト水を積んでいることなどを反映しているものと考えられる。

さらに、1.4.1で述べた外航船舶の燃料消費量推定値から算出されたマクロな輸送エネルギー効率も表 5.1-2に示した。ここでは、4.1で紹介した各船種ごとの輸送総量と年間燃料消費量から計算される世界全体での平均的な輸送エネルギー効率として捉えた。

外航船舶の平均輸送エネルギー効率である0.0053 kg-Fuel/トンマイル(トンキロ当たりのCO<sub>2</sub>量に換算すると9 t-CO<sub>2</sub>/トンキロ)は、表 5.1-1に示す鉄道輸送の1/2、営業用トラック輸送の1/22となり、輸送機関として優秀である事が理解できる。

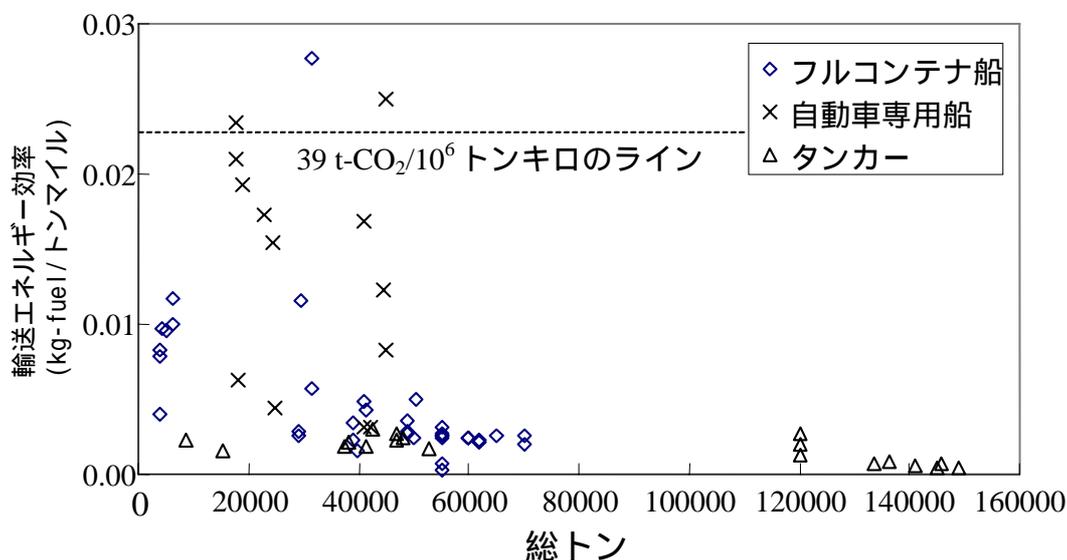


図 5.1-5 外航海運における輸送エネルギー効率(RT)の実績例

シップ・アンド・オーシャン財団(1992)「船舶排ガスの環境への影響と防止技術の調査」、環境庁(1992)、「船舶排出大気汚染物質削減手法検討調査」より作成。

表 5.1-2 外航海運における輸送エネルギー効率(RT)の推定

区分		輸送総量(TR) (10 <sup>9</sup> トンマイル)	燃料消費量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	CO <sub>2</sub> 排出量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	輸送エネルギー 効率(RT) (kg-Fuel/トンマイル)	CO <sub>2</sub> 発生率 (t-CO <sub>2</sub> /10 <sup>6</sup> トンキロ)
タンカー	原油	9,321	26	78	0.0028	4.5
	石油製品	2,289	9	28	0.0039	6.6
	合計	11,610	35	105	0.0030	4.9
バルカー	鉄鉱石運搬船	2,520	16	47	0.0063	10.1
	石炭運搬船	2,359	17	50	0.0072	11.4
	その他	1,365	5	14	0.0037	5.5
	計	6,245	37	111	0.0059	9.6
コンテナ船		3,519 (352 × 10 <sup>9</sup> TEU マイル)	45	135	0.0107	20.7
総計		22,079	117	351	0.0053	8.9

コンテナ貨物については、1TEU=10tとして重量換算した。

総計の燃料消費量には不明分を含む。

### 5.1.3 輸送エネルギー効率向上技術とその可能性

CO<sub>2</sub>削減対策は、輸送全体に係る燃料消費量の削減つまり輸送エネルギー効率(トンマイル当たりの燃焼消費量)の改善に他ならない。船舶における輸送エネルギー効率改善のための対策は、船舶の運航経済性を向上させるものとして積極的に推進されてきた課題であり、特に1970年代のオイルショック時に大きな進歩を見せた。輸送エネルギー効率の改善は、主に下記の3つの方向で進められてきた。

- (a) 船の大型化と減速航行による輸送エネルギー効率の改善
- (b) 船型の改善を含む船の推進性能の改善
- (c) 主機関の燃料消費率の改善

将来において更なる輸送エネルギー効率の改善の可能性として(a)~(c)を見た場合、(a)についてはオイルショック後は比較的石油価格が安定しており、また世界的な景気低迷により輸送需要の伸びは比較的緩やかになると考えられるので、オイルショック前後のような大型化や減速航行による輸送エネルギー効率の改善は期待しにくい。従って、本章においては(b)船の推進性能の改善と(c)主機関の燃料消費率の改善による省エネルギー対策を中心に、各要素技術ごとにその将来性について造船メーカーなどへの聞き取り調査及び文献調査により定性的な評価を行った。

輸送エネルギー効率向上に対して有効と考えられる技術について評価した結果を表 5.1-4及び表 5.1-5にとりまとめた。短期的、中長期的技術の区分は、COPの目標設定年である2008~2012年において、広範な範囲で実船に対して適用可能であるかを基準とした。

#### (1) 船型の最適化

船の推進性能の改善には、造波抵抗及び粘性抵抗の減少を図る必要がある。造波抵抗は高速船で大きな問題となるもので、水面下の船体の寸法及び形状に関係し、主に船首と船尾部分で発生する波に推進エネルギーを奪われることによって生じる抵抗である。粘性抵抗は水面下表面積とその粗度に比例する摩擦抵抗のほか形状に影響され肥大船では抵抗の大部分を占める。

以前から、船首部にはバルバスバウ(球状船首)を採用したり、船尾についても船尾バルブなどを設けて、伴流を増大させ、プロペラ部分への流入速度をできるだけ遅くさせることで不均一流を発生させない形状を取るなどの改善がなされてきた。

また従来は、方形肥せき係数(C<sub>b</sub> 値; Block Coefficient)や L/B 値など船型の主要目については、経験的に蓄積されたデータベースから大きさや速力などの要求スペックに類似の船型を母船型として選定し、その性能データと性能計算ツールを利用して、あるいは水槽試験を繰り返して設計されてきた。

最近では、CFD(Computational Fluid Dynamics)に基づいて、上記主要目や船首尾の形状を含めて、造波抵抗あるいは粘性抵抗を最小とする最適形状を設計する手法が多く取られている。例えば 999 総トンの内航貨物船の場合、一定の載貨重量トン数と船速を保ちつつ、船体形状

を在来船よりもやせ型にして造波抵抗を少なくするとともに、後述の低回転大口径プロペラを採用することにより燃料消費量を 10%程度低減すると言った船型開発が進められている。

しかしながら、海洋波との干渉など必ずしも CFD の元となる個々の影響要因が実験水槽やテストベッドでの性能評価と一致せず、実海域での性能が十分予測できるとは言えない面がある。そのため、波浪を含めた実際の航行条件を想定して評価することが肝要であり、CFD の結果や水槽実験の試験データと比較対照すべき実海域における波浪の状況とその際の船体回りの波や乱流発生状況などを収集・解析(モニタリング)手法の開発等も同時に進められている。また、喫水の違いによる造波及び粘性抵抗の違いも大きいため、バラスト、満載の両航海時に推進性能の差が生じにくい船体の開発や、運航速度・海況の影響を受けにくい船体の開発が望まれている。

新造船の場合は船首バルブや船尾付加物の設置は、イニシャルコストとしてほとんど影響しないため適用に障害はない。ただし、レトロフィットは船尾ダックフィンの設置など一部を除いて困難である。寸法比や船型による改善は従来から行われてきており、今後の輸送エネルギー効率の改善幅は最大でも数%程度と考えられる。

## (2) 船底防汚塗料などによる表面粗度の平滑化

一般に船舶の水面下の外板には防錆力に優れ耐水性の高い船底塗料が塗布されており、さらにその上にフジツボ、イガイ類、藻類、スライムなどの生物の付着を防止する船底防汚塗料が塗られている。近年までトリブチルスズ基をアクリル樹脂に結合させたトリブチルメタクリレートポリマーと亜酸化銅の組み合わせ塗料(以下「TBT 塗料」という)が使用されていたが、日本においては 1990 年前半から TBT 塗料の使用が実質的に禁止された。また、IMO においては、2003 年 1 月 1 日以降の TBT 塗料の新規塗布を禁止すべく、国際条約化に向けての審議が進められている。

船底塗料としての TBT 塗料は、付着生物の防汚効果もさることながら、自己研磨によって船底表面の微小凹凸の変化が少なくなり摩擦抵抗の経年劣化が少ない、という省エネルギー塗料としての側面があった。また、その性能寿命が長いので必要入渠間隔が長くでき、年間の実質航海日数が増加するため、全体としての輸送エネルギー効率の改善に繋がっていた。

イギリス造船研究協会(BMT、1980)によれば、船体の平均粗度が 45 ミクロン荒くなると、摩擦抵抗の増加のために 25 万 DWT タンカーでは同出力、同バラスト状態で 0.2 knt の速力低下につながるというデータもある。このように 1990 年代まで省エネルギーに大きな貢献をしていた TBT 塗料は海洋生物の生殖機能への影響等から使用禁止に追い込まれ、新たな省エネルギー塗料の開発が進められている。

TBT 代替塗料は、トリアルキルシリレート系や金属エステルなどのアクリル系ポリマーを用いた加水分解型自己研磨塗料を中心に開発が進められている。現在、皮膜寿命は入渠間隔をカバーする 30~36 ヶ月程度まで持続するようになっており、塗料価格では TBT 塗料に比較して 1.2~2 倍程度まで生産コストの低減が進んでいる。

MEPC の決定によりコスト面では世界中でイコールコンディションになったとも言える

が、入渠回数の増加や燃料消費量の増加を勘案すると、ランニングコストを含めた20年間の総コストはおよそ0.92%増加するという試算もある<sup>19</sup>(造研,平成10年)。一方、省エネ性能については、短期的にはTBT塗料並みは期待出来ないと考えられている。

また、塗料に含まれる有機金属の毒性を避けるために、金属フリーの塗料として、シリコン系樹脂やガラス樹脂などを使用し撥水効果を持たせた塗料も開発中である。小規模な付着実験では24ヶ月程度の防汚寿命が報告されているが、皮膜の物理的脆弱さが問題となっている。また、船体そのものにチタン系合金または銅ニッケル合金を用いて表面の平滑化と防汚を兼ねるアイデアも1980年代に提案されている。今後コスト的に見合うか、再検討する必要があるかもしれない。

また、導電塗膜については、太陽電池と組み合わせた小型レジャーボートなどへの応用例がある。しかし、防汚効果を発揮するには塩素を発生させるまでの電解強度を船体全体に均一に発生させることが必要であり、大型船舶への応用はコストや施工精度から考えて困難と考えられた。同様に船首部に大型の塩素発生装置を組み込み流線上に拡散させる方式も開発されているが、コスト的に代替塗料と比較して不利と考えられる。

### (3) マイクロバブル技術による摩擦抵抗の低減

摩擦抵抗の積極的なコントロールとして、開発中の技術ながらマイクロバブルを用いて摩擦抵抗を減少させる技術がある。マイクロバブル法は、直径1mm以下の微小気泡を船底に流し船底表面と流水との境界層中に発生する乱流を抑制する事で、摩擦抵抗を大幅(20%程度)に減らすものである<sup>20</sup>。また、常時のマイクロバブルの放出は、生物附着に対しても防止効果が期待できる。同種の技術には、船体表面に細かい溝を設けるリブレットや船体表面に扁平な物体を置くLEBU(Large Eddy Break Up)などがあり、船体表面における境界層の発達を抑える目的で研究がすすめられている。これら摩擦抵抗の削減技術は、日本造船研究協会においてSR239として摩擦抵抗低減技術の一つとして研究開発が進められている。

なお、クリーンな排ガス(現行のディーゼル排ガスをそのままスクラブすると、油汚染のおそれがある)をマイクロバブルに用いた場合、排ガス中のCO<sub>2</sub>の海水への溶け込みもある程度期待できる。CO<sub>2</sub>排出抑制効果については、海水中のCO<sub>2</sub>平衡状態を加味した検討が必要と思われるが(溶け込んだCO<sub>2</sub>が再度大気中に移行する場合がある)、外洋ではCO<sub>2</sub>のシンク(大気からCO<sub>2</sub>を吸収する海域)になっている海域も多い事から、大気へのCO<sub>2</sub>放出量を減少させる可能性も考えられるものである。

### (4) 船体重量の軽減

船体重量の軽減は、同じ燃料消費量であれば載荷重量トンの増加に繋がるため、輸送エネルギー効率の改善に繋がる。TMCP鋼の出現以降、船体構造に高張力鋼が広範に用いられ、パネルの薄肉化による船体重量の軽減が進んできた。高張力鋼は採用当初は応力の最も高い

<sup>19</sup> 日本造船研究協会(1998), 第76基準研究部会 海洋汚染防止に関する調査研究(船底塗料関係)

<sup>20</sup> 高橋他(2000), 第74回船舶技術研究所研究発表会講演集

上甲板の中央部付近に限られていたが、次第に拡大して現在では船舶の全重量の70～80%に及んでいる。仮に軟鋼(NK規格でKA)の船舶が70%程度を高張力鋼(KA36)などにした場合、24万DWTのタンカーではコロージョンマージン(長期間の使用後の腐食などにより部材の厚みが薄くなる割合)を見込んだ上でおよそ5,000トンの重量削減に繋がると試算できる。旧運輸省運輸政策審議会が1997年にまとめた「運輸部門における地球温暖化問題への対応方策」でも内航海運の省エネルギー対策として前項の「船型の見直し」とあわせて、「船体重量の軽減による省エネ化を進めるとともに、船舶の大型化を図り、単位当たりの燃料消費量を削減」することが記載されている。

日本国において建造される船舶では溶接技術や材料の限界まで軽量・薄肉化が進んでおり、現状の設計では各構造部材の座屈防止条件が制限要因となっている。このため、さらなる高張力鋼の開発などがなければ現状より大幅な軽量化は困難と考えられる。残された軽量化として上部構造や甲板ハッチ部へのアルミ部材の適用などが考えられるが、外航の大型貨物商船では、その効果は数%程度であること、現行法規上軽量部材の使用に一部制限があることなどから、汎用性は小さいと考えられる。

なお、ダブルハルタンカーのように本来の貨物輸送と関係のない鋼材やパネルを使用することは、船殻重量の増加に繋がり輸送エネルギー効率としては不利となる。ただし、ダブルハル規制が世界全体の燃料消費量に与える影響はごく少なく、むしろ新船への代替による燃費向上により、全体の輸送エネルギー効率は改善すると考えられる。

#### (5) プロペラ効率化

船舶の推進システムには、古くからプロペラによってトルクを推力に変換する手法が用いられてきた。当面はプロペラ推進の使用は続くものと考えられる。ここではプロペラなどに関する新技術について集約した。

##### プロペラの大口径化

船舶のプロペラ推進性能を改善する方法として過去に最も省エネルギー効果もたらしたものは低回転大口径プロペラである。低回転化によって生じたキャビテーション限界への余裕を大口径へ回すことによって推進効率を向上させるものである。機関の低速化による熱効率の向上、減速機を使用しないことによる信頼性と機械効率の向上も同時にもたす。現在ではプロペラレーシング(プロペラが水面上に出て空回りすること)が起きない範囲内で大口径化が講じられている。

プロペラの大口径化に伴う技術として、大口径プロペラを収納でき、かつこれに伴う抵抗増加や船体効率の低下を抑えた船尾形状の研究(球状切り開け船尾など)、ハイスキュープロペラによるキャビテーション防止・起振力の軽減など、プロペラ推進に付随する現象に対しての対策技術も進んでおり、ほぼ完成段階にあると考えられる。

## PBCF(プロペラボスキャップフィン)

1987年に開発されたPBCF(プロペラ・ボス・キャップ・フィンズ)は、プロペラの先端に取り付ける比較的簡易な手法であるが、プロペラの推進効率を高める効果大きい。プロペラの回転流は中心部に渦状の低水圧部分が生じる。この低圧は船体を後方に引き戻す抵抗(ハブ渦エネルギー)となり、高速船ほどこの傾向が大きい<sup>21</sup>。PBCFの採用により、同じ主機関負荷で1~2%のスピード上昇もしくは同じ航海速度で4~5%の燃料消費量節減が得られる。また、取り付け時間も半日程度で、この種のレトロフィット技術としては短時間で済む。これまでに700隻を超える船舶に採用され、大型船では韓国で竣工したLNG船4隻から小型の高速漁船にまで設置されており、適用範囲も広いと考えられる。

## ダクトプロペラ

プロペラを円筒形のノズルに収めたもので、放出流が収束され高速となる。小型ノズルプロペラには旋回できるもの(ポッドプロペラ)もあり、この場合は舵が不要となる。船体起振力に対してはノズルそのものが抵抗となるため、若干有利になると言われる。ダクトプロペラはダクト内面のエロージョン(潰食)が生じやすいという欠点がある。80年代に大型タンカーへの設置例もあるが、主にコストの面から現在では小型船への設置に留まっている。ダクト位置をプロペラの前後に設置するなど最適化することで今後大型船への適用も十分に考えられる。長期的には電気推進とあわせたポッドプロペラが有効であるものと思われる。

## 二重反転プロペラ(コントラプロペラ)

二つのプロペラを前後に配置して互いに逆方向に回転するようにしたプロペラ推進装置であり、前方のプロペラ後流中の推進に寄与しない回転成分のエネルギー(旋回流)を後方のプロペラで吸収できる省エネルギー型のプロペラである。二つのプロペラで主機の推進力を分担するので、プロペラ径が小さく済むという利点もあり、大型コンテナ船へ応用することで一軸船の船型の限界を大きくすることも期待されている。26万DWTのタンカーなどに設置され、14%の省エネ効果が確認された例もあり、信頼性も充分確保できると考えられる。ただし、逆転機構や軸受けの構造が複雑になることからイニシャルコストが高く、スペースユーティリティの面でやや不利とされているが、大型コンテナ船で2軸とするよりも、コントラプロペラを用いた一軸船にメリットがある場合も考えられる。

また、本来の二重反転プロペラではないが、主機直接駆動の主プロペラ直後の同軸の位置に主プロペラと逆回転のポッドプロペラを物理的結合なしに設置するシステムも

<sup>21</sup> 日本船用機関学会誌 第27巻第9号抜粋 平成4年9月 PBCFの効果と実績  
日本船用機関学会 第一研究部会資料 PBCFの研究開発 プロペラ後流調査及び実船性能について

提案されている。この逆回転ポッドプロペラシステムは、巨大コンテナ船の推進効率を10～15%高める効果があるとされている。

#### CPP(Controllable Pitch Propeller)

プロペラの翼角を変化させるもので、主機関を燃焼効率の良い一定速度で回転させたまま翼角を変更する事で推進力を変化させることが可能で、逆転も可能なため主機関の逆転機構が不要である。また、停船や微速時にも主機を運転させたままでよいことから、停船操作の多い高速フェリーなどに用いられている。実用化技術であり、数～10%程度の輸送エネルギー効率の改善が見込まれる。イニシャルコストがプロペラ付加物に比較してやや高くなる。しかし、本来操船性を高めるためのデバイスでありその輸送エネルギー効率の向上は小さく、一定速度で長距離を航行する外航船舶に対して適しているとは言えない。

これらプロペラ推進技術についての特徴を表 5.1-3にまとめた。PBCFは小型船舶から大型船までの適用が可能である。船体本体価格のおよそ10%未満のコストでレトロフィットが可能であり、その省エネ効果は平均して5%程度は見込まれると予想される。二重反転プロペラは大型低速の機関を得意とする。またCPPは4サイクル機関との組み合わせで高速かつ機関スペースに制限のあるRORO、PCCなどでの使用が適していると考えられる。

表 5.1-3 プロペラ推進効率向上のための各種技術の適用試算例

短期的方策(技術)	満載時のエネルギー効率上昇分(%)	バラスト時のエネルギー効率上昇分(%)	改造費(円)	改造のための入渠期間(日)	回収期間(年)
PBCF	6	5	3,500万	2	4
ダクトプロペラ	10	8	8,600万	15	9
二重反転プロペラ	9	8	14,300万	25	10
CPP	3	4	5,200万	15	15

長さ240m、Cb値0.80のタンカーへの適用計算例  
Marine Report No.23 1996年6月より作成

#### (6) 舵の改良

舵は通常プロペラ推進装置では必須な装置であるが、それ自体が抵抗となって船体の摩擦抵抗を増加させる。プロペラの回転により生じた旋回流を受けるため、プロペラ回りには複雑な水流による圧力及び横圧力が発生する。従来から舵に当たる水流の抵抗をできるだけ少なくすること、水流に対する舵の効きを良くすること、回転流のエネルギーを推進力に転換させること、などを中心に技術開発が進められてきており、コストバルブラダー(舵の側面にバルブ状のふくらみをもたせる)、ベッカーラダー(飛行機のラダーのように先端で角度が急峻になる)、フィン付きラダー(舵前方部分に水平状のフィンを取り付ける)などが開発されているが、実用例が少なく、現時点ではその省エネ効果を検討するのは困難と思われた。

#### (7) ディーゼル機関の燃費の改善

船舶用ディーゼル機関の燃費改善のための技術開発の成果には目ざましいものがあった。

最近においても、静圧過給及び過給機の性能向上、燃料噴射率の改善、ロングストローク化等の結果、従来から中・大型船の主機関の主流をなしてきた大型低速2サイクルディーゼル機関では、約20年間でその燃料消費率は150g/PSh台から120g/PSh台へと約20%も改善されている。

近年は技術の動向は低質燃料への対応と、メンテナンスコストの低減、そして低NO<sub>x</sub>技術へと重心が移りつつある。そのため、熱効率の向上は近年横ばいの状況にある。

噴射の電子制御について、各メーカーとも積極的に取り組んでいる。噴射時期、噴射量などの噴射プロファイルを、気筒ごと、負荷ごとにあるいはサイクル内で変更可能になるため、燃焼を全体に均一にする事が可能であり、得られたマージンを進角に回す事によって、NO<sub>x</sub>の排出量を増やすことなく熱効率の改善が期待できる。

また、ユニット全体としての熱エネルギーの回収による船舶プラント全体のエネルギー有効利用の可能性は大きく、その検討が今後の重要課題と考えられる。燃料油のもつ熱エネルギーのうち動力化されるのは45%前後であり、残りは一部船内の熱源あるいは船内電力用の発電動力源として使用されている他は、海中及び大気中に捨てられている。これらの排熱をできるだけ有効に回収し利用することが重要である。特に最近では、コンテナ船や冷凍冷蔵船など航海中に推進以外に大きなエネルギーを必要とする船舶が多くなっている。現在でも軸発や排気エコマイザーなどの技術が用いられているが、更なる排ガス排熱回収率の増大、低沸点熱回収媒体の研究、排ガス排熱を直接の熱源として利用する吸収式冷凍冷蔵システムの導入などの検討が今後必要であるものと思われる。

#### (8) 代替燃料

重油以外の低公害あるいは低CO<sub>2</sub>排出燃料として、LNG、メタノール、水素などの代替燃料がある。これら、ディーゼル機関に対する代替燃料については、陸上でも開発実用化が進んでおり、大型のガスエンジンについても発電用などで十分な実績がある。また、特にLNGについては、LNG船のボイルオフガスの利用のため、ガスエンジンの検討も行われてきた。800mm × 2,300mmの船用エンジンも開発されており、技術的要素としては実用化に充分近いと言える。メタノールについても陸上発電機関を応用し重油をパイロット噴射する機関が開発されている。これらについては、同程度の軸出力を得る場合のCO<sub>2</sub>排出量が10~20%程度減少するとしている試算もある。

また、水素については大型ガスエンジンの開発例は少ないが、自動車用エンジンの技術開発が進んでいる事、機関からのCO<sub>2</sub>排出率がほぼゼロであること(水素生成の段階で発生する可能性がある)から開発が望まれる。

(9) その他の技術

帆走を補助に使う技術は、過去に何度か検討されてきた。

財団法人日本船用機器開発協会<sup>2.2</sup>では、平成2年に1,600DWT内航貨物船、28,000DWTバルクキャリア型を対象に、近代帆走装置による風力の利用の他に、船体風圧抵抗の減少、主機関C重油燃焼の低負荷域拡大、推進効率の向上及び最適プロペラの採用、推進抵抗の減少、船殻重量の減少、艀装品の軽量化の対策を施した超省エネ船の概念設計を行った。その結果、設計上は貨物船で約41%、バルクキャリアで約34%の輸送エネルギー効率の向上が得られると予測した。またデンマーク環境エネルギー省においても、1995年から50,000DWTクラスの外航商船への適用を目標にして同様の帆走補助技術の研究が進められている。試算においては建造コストは10%程度増大するものの、航路や速力の選択如何では25~50%の燃料消費量削減効果が得られるとされている。

荒天時の安全対策や軽量帆材の実用化などを含めて実用化には課題が多いが、気象海象予測の進歩に併せた帆走補助航法の開発や上部構造物が大きな船舶の揺動の研究も含め、今後のさらなる開発が必要であろう。

---

<sup>2.2</sup> 高性能近代帆装商船の設計(1990年)財団法人 日本船用機器開発協会

表 5.1-4 燃料消費量削減に有効と考えられる短期的な諸技術の定性的評価(まとめ)

項目	技術の概略	長所	短所	備考
推進性能の向上	船型の最適化	過去の研究により十分な知見が蓄えられている。	荷役効率や港湾施設の制限など外部制約要因が大きく、設計の自由度は少ない。	船型の改良で、最大で現船型から5%程度向上の可能性がある。
	造波抵抗の低減	小型フィン等船体付加物による改良。	既存船に設置可能。過去の研究により十分な知見が蓄えられている。	10%程度の改善が期待できる。
プロペラ性能の向上	摩擦抵抗の低減	TBT船底塗料に代わる新たな船底防汚塗料の使用により、従来と同等またはそれ以上に摩擦抵抗を低減し、生物附着を防止する。	全面的規制の動向に対応すべく、既に開発が進められている。	塗料自体のコストがTBTの約2倍、量産化により解消されるものと期待される。
	二重反転プロペラ	同軸上に重ねて配置したプロペラを互いに反転させる。	振動及びキャビテーションの防止にも有効。	最大5~10%の推進効率向上が期待できる。
船形とプロペラの相互干渉の利用	プロペラ付加物	ボスキャップにフィン等の船体付加物を設置する。	既存船船での改造が可能。	既に700以上の実施例があり、約4%の推進性能向上が期待できる。
	船形とプロペラの相互干渉の利用	船尾付近の流れを考慮したプロペラ位置と船尾形状の最適化。	過去の研究により十分な性能評価手法や設計法が整備されている。	二重反転プロペラ、ポッドプロペラ等の新型プロペラの場合、推進効率を10%程度向上可能。
機関の改良	新式機関への交換(過給機の交換など含む)	熱効率が低い旧型ディーゼル機関を高効率の新式機関に交換する。	技術的に可能であり、過去においてタービン主機からディーゼル主機への交換実績は多数ある。	船齢、コストとの兼ね合いで、実行できる船舶と実行できない船舶が生じると考えられる。燃費を最大20%程度向上可能。また、過給機単体の換装も考えられる。
	総合的な主機関熱効率の向上	電子制御による燃焼室への燃料の噴射タイミング・噴射時間・噴射率の最適化、燃焼室形状の最適化など。	コスト的に比較的安価。既存船での改造も可能。	2サイクルで4~6%、4サイクル機関で4~8%程度向上できる可能性がある。燃焼室内温度の均一化により、NOxの排出量の抑制と機関の効率改善の両立が期待される。
維持管理の改善	的確なメンテナンスの実施 主機能の維持	船底の汚れを定期的に除去する。過給機の圧力マッピング、掃気弁の清掃。	ドックでのメンテナンスを前提にすると、現状よりドック期間が長くなり、コストが高い。	15%10年程度で推進効率が悪化する現在の燃年劣化を、10%/10年程度に抑えることができる可能性がある。停泊中のメンテナンス技術が不足している。船底ロボットなどの導入などが考えられる。

表 5.1-5 燃料消費量削減に有効と考えられる中長期的な諸技術の定性的評価(まとめ)

項目		技術の概略		長所		短所		備考	
燃料転換	代替燃料への転換		重油からメタノール、DME、LNG、水素等の熱量あたりのCO <sub>2</sub> の排出量の少ない燃料に代える。	陸上において高速ディーゼル機関への適応例は多い。	単位体積あたりの発熱量が小さいため、燃料積み込みスペースが大きい。大型船舶機関への適応には、さらに技術開発が必要。	NOx排出量の低下が期待できる。排ガスがクリーンなのでリサイクル回収時に、ガス中のCO <sub>2</sub> 分離が容易。燃料生産・供給体制の整備も必要。			
	摩擦抵抗の低減	マイクログラブル	微細な気泡を船体表面の乱流境界層に注入する。	船首付近に気泡発生装置を設置する程度なので、技術的には比較的容易。	気泡発生に要するエネルギーが大きい。現状では全体として省エネにつながっていない。	実験値では10%程度摩擦抵抗を減らさせ、燃料消費量ベースでは5%程度の向上の可能性がある。より効果的に気泡を発生させる手法の開発が必要。			
推進性能の向上		リブレット	喫水面下の船体表面に流れと平行に小さな溝を並べたもの。	喫水面下船体の表面の加工のため既存の船舶へ適応可能。	フジツボ等の汚損生物が付着しやすい。管理コストが増大する可能性がある。	8%程度の摩擦抵抗の減少が報告されている。溝の最適化には0.1mmオーダーの加工が必要になる。			
		ダクトプロペラ	電動モーターとプロペラが一体化した推進機を船尾に設置する。推進機自体を回転させることにより船の機能も併せ持つ。	舵が不要なことによる船尾の設計の自由度の向上、省スペース等により、総合的に輸送効率向上が期待される。新造船での適用は可能性がある。	イニシャルコストが極めて高い。電気モーターで全推進エネルギーを賄うため、大規模な発電設備が必要であり、効率面で問題が残っている。	技術的には可能。既にフェリー等で設置されている例がある。			
	波浪による動揺の少ない船体の開発		喫水面上の船体形状を改良することで、波浪による抵抗増加を抑える。	航路の自由度が大きくなる。荒天時の意図的な速度の低下を最小限に抑えられる。	喫水面積の自由度が大きい。波浪による意図的な速度の低下を最小限に抑えられる。	系統的な調査例は少ないが、波浪の影響により推進性能が30%低下したという事例がある。これを半分程度まで抑えることが期待されている。			
機関の改良	新型機関の開発	ターボコンパウンド機関	排ガスの一部によってガスタービン駆動し、動力をクランク軸へ還元する。	陸上においては適応例がある。	小型ガスタービン及び減速機の信頼性の向上が必要。	陸上の高速機関においては静圧過給タービンと比べて4%程度の向上。			
	電気推進機関		水素を燃料とし、燃料電池で発電しモーターを駆動する。	燃料電池自体の技術は確立されている。陸上において適応例がある。技術的には比較的容易。	燃料貯蔵用に水素吸蔵合金を用いた場合、その重量が問題となる。油、石炭などから船内で水素を生産する場合も、新たに船内スペースが必要になる。	水素ガスの製造過程以降では、CO <sub>2</sub> エミッションが0である。直流の大型モーターもしくは大容量の整流器が必要。			

## 5.2 CO<sub>2</sub>以外の削減対策に関する調査

### 5.2.1 CH<sub>4</sub>排出対策

2.1.2に述べたように、CH<sub>4</sub>の排出経路としては機関からの未燃焼分と原油輸送に伴う排出の二つが上げられる。

機関からの未燃焼分としてのCH<sub>4</sub>の排出は、低回転ディーゼル機関の場合には燃焼時間が十分に長く、排気中にメタンガスとして含まれる可能性は小さいと考えられる。一方、機関下部や掃気系に抜けてしまったブローバイガスが排気中へ排出されている可能性は大きいと考えられる。

ブローバイガス対策は、自動車機関においてはメタン以外のHCガス排出対策にもなることから、PVC(Positive crankcase Ventilation System)装置が既に全ての機関に設置されている。これは、クランクケース内の気体を絶えず吸気系の配管に引き込み、ケース内の圧力を大気圧に対して絶えず負圧に保つことでケースからの蒸散ガスの漏洩を防止するものである。船用機関についても、同様の機構の開発によりCH<sub>4</sub>の排出を抑制することが可能と考えられる。

次に、原油輸送に伴うCH<sub>4</sub>排出対策については次のように考えられる。

国内原油備蓄基地では、グラウンドフレアスタック等の施設によって原油ガスを含んだイナートガスを燃焼処理している(図 5.2-1参照)。同施設は陸上備蓄タンク内で発生した原油ガスを含んだイナートガスを燃焼処理するためのもので、低酸素濃度の状態にあるイナートガスとの混合気の燃焼を補助するために助燃剤としてA重油を用いている。

このような施設により大気中に排出されるCH<sub>4</sub>を燃焼させると、結果として当然CO<sub>2</sub>が発生することになるが、両者の温室効果係数の差のため、温室効果ガスの放出量としては約70%の削減になる(下式参照)。

[ケースa] CH<sub>4</sub> 1トンがそのまま排出された場合

$$1 \times 21 = 21 \text{ t-CO}_2 \quad (21 \text{ は CH}_4 \text{ の温室効果係数})$$

[ケースb] CH<sub>4</sub> 1トンを燃焼させた場合

CH<sub>4</sub>燃焼によって:

$$1 \times 44/16 = 2.75 \text{ t-CO}_2 \quad (44: \text{CO}_2 \text{ の分子量、16: CH}_4 \text{ の分子量})$$

助燃剤燃焼によって:

$$2.75 \text{ t-CO}_2 \quad (\text{CH}_4 \text{ と同じC量の助燃剤を使用すると想定})$$

$$\text{合計} 5.5 \text{ t-CO}_2$$

$$[\text{ケースb}] \div [\text{ケースa}] = 27\% \quad (= \text{CO}_2 \text{ 換算で約70\%の排出抑制})$$

原油タンカーへの積み荷作業時に、図 5.2-1の太点線に示すようなガスリターンラインを敷設し、陸上で処理する事によって大気に排出される原油ガスの処理は技術的には可能である。

また、運航中の原油ガスについては、その排出速度がごく小さいことから、ベントポスト内のフレイムアレスタの直前に活性炭などで形成されるキャニスターを設置し、CH<sub>4</sub>ガスを含めたVOCガス類を吸着させ、交換回収して陸上で脱着処理または燃焼廃棄するなどの方策が現実性のある有効な方法と考えられる。

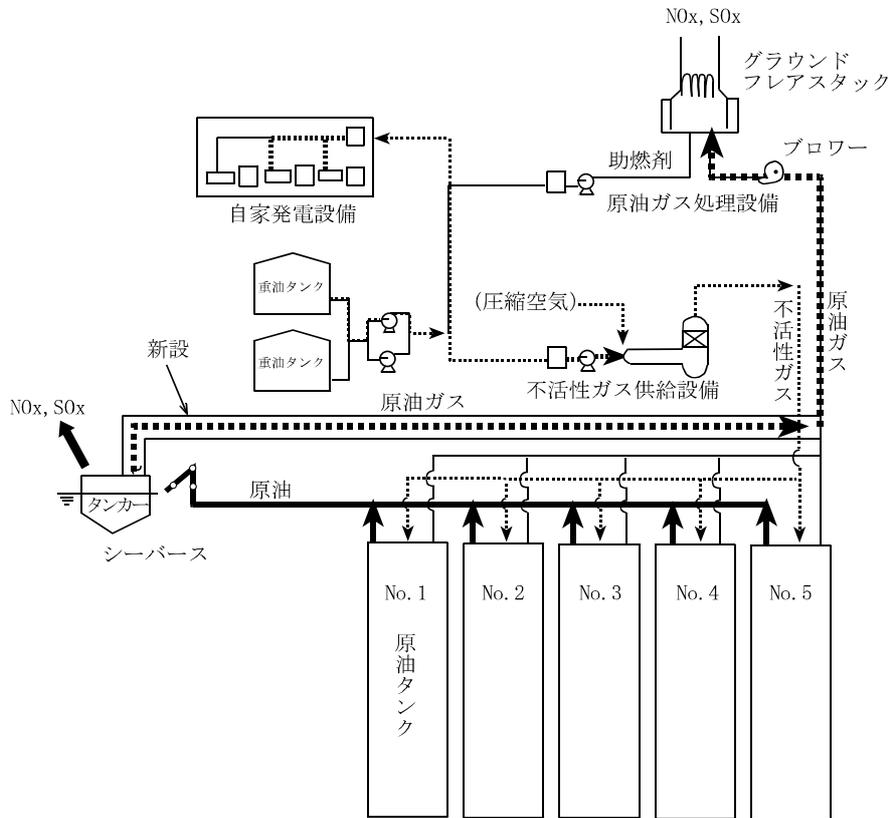


図 5.2-1 原油積み込オペレーション時の原油ガスの動き概念図

## 5.2.2 N<sub>2</sub>O排出対策

N<sub>2</sub>OはNの酸化が不完全な状態であるから、理論上は酸化を進めることでN<sub>2</sub>Oの排出削減することが可能である。ただし、その場合はNO<sub>x</sub>の排出量が多くなり、別の意味で環境には好ましくないことになる。例えば、着火遅れを短くすることによって燃焼状態を良好にした場合、P<sub>max</sub>も高くなってN<sub>2</sub>Oは削減すると考えられるが、結果として初期燃焼雰囲気下においてThermal NO<sub>x</sub>(NO)濃度の増加を招く可能性がある。また、燃料中のN分が酸化される過程は複雑であり、部分的に酸化過程を制御することも困難と考えられる。今回実施した調査でも(2章参照)、2サイクル機関では燃焼状態の良好な部分でN<sub>2</sub>Oの発生の増加が見られている。

自動車用機関での対策をみても、燃費の改善とともに走行距離当たりのN<sub>2</sub>O排出係数の改善を期待しているが、N<sub>2</sub>O排出濃度そのものの具体的な改善策は示されていない。なお、3元触媒使用のガソリン機関においては触媒劣化時にN<sub>2</sub>O排出濃度が高くなることも報告されている。

一方、NO<sub>x</sub>軽減を目的とする排ガス脱硝装置は十分な脱硝反応時間をかけることによってN<sub>2</sub>Oも分解することが、陸上固定機関などの実験や船舶技術研究所の予備実験<sup>2,3</sup>などでも明らかになっている。排ガス脱硝技術については、アンモニアまたは尿素を用いた選択接触還元法(SCR法)が技術的に最も確立されており、有効性も確認されているが、船舶への適用には課題も多く、排ガス温度が低い出港時には触媒が有効に働かない等の問題がある。

このため、低温時にはマンガン-ジルコニウム複合酸化物(Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・2ZrO<sub>2</sub>)やバリウム-銅化合物(BaCuO)等の吸着剤にNO<sub>x</sub>を吸着させ、一定温度以上になってからNO<sub>x</sub>を分解するシステムの研究をシップ・アンド・オーシャン財団では実施している。これは主に出入港の多い内航船を対象に小型システムの開発を目標に行っているものである。このような研究開発や設置スペース上制約のある船舶に搭載可能な省スペース型の脱硝装置の開発により船舶にも適用可能な脱硝装置の開発を推進し、船舶からのNO<sub>x</sub>、N<sub>2</sub>Oの排出をともに削減することが可能であると考えられる。

---

<sup>2,3</sup> 船舶技術研究所(1998),平成10年春季船舶技術研究所研究発表会より船用ディーゼル機関における脱硝装置の適合性について(第一報)

### 5.2.3 HFCs排出対策

陸上の自動車用クーラーの整備や業務用冷蔵・冷凍庫の整備においては、整備時の冷媒の漏洩を防止するため、冷媒の漏洩量を最小限に抑える器材が使用されている。例えば、再充填時に接続パイプ部を事前に吸引する装置、冷媒を回収ストックできる充分なりザーブタンク等である。しかし、船用冷凍庫や冷蔵・冷凍コンテナでは、フロン類の使用混在もあり、代替フロン専用のこのような器材はあまり使用されていないのが現状である。

冷蔵・冷凍コンテナは、直射日光が当たり高温になる甲板上や換気の悪い船倉下部などに設置される場合も多く、また荷役に伴う振動や衝撃も相当に多く、さらに荷積み直後には高負荷運転が行われるなど、陸上の冷凍施設より過酷な使用条件で使用される。また、メンテナンス間隔も陸上に比較して長くなることが予想される。

このため、例えば、コンプレッサー内やリザーバーなどに水分の浸入またはパッキングのかけらなどの混入が疑われた場合には、装置の保全上冷媒全量を入れ替えることが多いが、その際は冷媒の種類が異なることもあるため、充填されていた冷媒を全量廃棄するなど、再充填作業時の漏洩量はかなり多いと言われている。また、メンテナンス時において規定量より多めに冷媒を充填する場合もある。

以上のことから、陸上施設で既に行われているような冷媒の再充填技術の向上及び作業工程の改善は技術的に十分可能なはずであり、そのような対策でフロン類の放出量削減に大きな効果があると考えられる。なお、一部の冷蔵・冷凍コンテナについてはR12やR22などのフロン類が冷媒としてまだ使用されており、これらの廃棄時の作業管理も重要である。

一方、現在使用されているフロン類の代替物質の研究も進められている。非フロン系冷媒の性能比較を表 5.2-1に示した。古林ら<sup>24</sup>はフロン類の代替物質として、プロパン、イソブタン、ノルマルブタン、エタン等の混合ガスが冷媒として十分な性能を持ち得ると報告している。これらの代替物質は化学工場用冷却装置で既に使用実績があり、欧米で販売されている冷蔵庫など家電でも一部導入の試みがなされているが、いずれのガスも可燃性が高いことから輸送機関の冷凍・冷蔵コンテナへの応用にはより一層の安全対策が重要であり、実用までに種々の技術開発が必要であると考えられる。

アンモニアは産業用冷凍機で広く使用されており、船用においても冷凍船などで実績が多いが、ガスが弱燃性で毒性を持っていることから冷蔵・冷凍コンテナへの適用は困難と考えられる。また、炭酸ガスは自動車用エアコンへの適用が検討されているが、原理上<sup>31</sup>以上の環境下での運転が難しいことから、アンモニアと同様に固定の冷凍冷蔵施設などへ応用は期待されるものの、冷蔵・冷凍コンテナへの適用は困難であると考えられる。

なお、現在流通している発泡ウレタンなどの断熱材はHCFC類が発泡剤として利用されているものがほとんどであり、廃棄処理時にフロンの発生が予想される。これらの断熱材廃

<sup>24</sup> 古林義弘、山田一俊、梅田歳樹 (1999) 「ハイドロカーボン冷媒を用いた空調・冷凍装置」, 西部造船会論文概要, 98th., p1 7

棄時の漏洩量についても、今後は何らかの対策を講じることが望ましいものと思われる。

表 5.2-1 冷蔵冷凍用冷媒の比較

	オゾン層破壊係数 (DOP)	地球温暖化係数(GWP) (100年)	冷凍能力	毒性	可燃性
CFC-12(R12)	1	8500	同等	無	無
HCFC-22(R22)	0.055	1700	基準	無	無
R134a	-	1300	同等	無	無
アンモニア (R717)	-	-	同等	有	弱
プロパン(R290)	-	3	やや低い	無	有
CO <sub>2</sub>	-	1	やや低い	無	無

オゾン層破壊係数はR12を、温暖化係数はCO<sub>2</sub>を1として計算  
 冷凍能力はHCFC-22を基準とし、外気/庫内40 /-20 で評価

### 5.3 温室効果ガスの削減技術のまとめ

CO<sub>2</sub>削減技術としては、設置の容易さ、既存の船にも導入可能なこと、及びイニシャルコストが比較的低いこと等から、PBCF等の推進機に対する改良による輸送エネルギー効率の改善が、短期的スパンでの削減技術として適していると考えられた。

また、中長期的技術としては、マイクロバブル等による船体摩擦抵抗の改善及び代替燃料の使用、そしてディーゼル機関から他のコンセプトの主機関への変更が有望であると考えられた。

CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスについては、CH<sub>4</sub>を含む荷役時の原油ガスを陸上側施設で処理する事、冷蔵冷凍コンテナの冷媒の管理を陸上並に行って、HFCsの漏洩量を少なくする事が短期的技術として適していると考えられた。

## 6 外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの削減に関する海外情報についての調査

### 6.1 気候変動枠組条約締約国会議における論議

CO<sub>2</sub>を含む温室効果ガスの削減方策は気候変動枠組条約(UNFCCC)の締約国会議(COP; Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change)において全体的論議が実施されている。

1997年12月に京都で開催された第3回気候変動枠組条約締約国会議(COP3)において京都議定書が採択され、温室効果ガスとしてCO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFCs、PFCs、SF<sub>6</sub>の6種類の物質群を削減対象とすることが決定された。また、陸上発生源からの温室効果ガスの排出量について、削減の義務のある附属書 国においては2008～2012年の年間排出量の平均を1990年の排出量に対する削減目標として国別に設定し(国別差異方式)、附属書 国全体で平均5.2%の削減を目指す事で基本合意がなされた。この結果、わが国は6%の削減目標(米国7%、EU諸国8%など)に沿って対策を進めることとなっている。

引き続きCOP4、COP5にて具体的な削減方策やオプションについて検討される予定となっていたが、今のところ植林吸収量の扱いや排出権取引のあり方などについて各国の合意が形成されているとは言えない。

2000年11月にオランダのハーグで行われた第6回気候変動枠組条約締約国会議(COP6)では、主に、吸収源、京都メカニズムの補完性、遵守制度の3つの点で、EUとアンブレラグループ(非EUの先進国による交渉グループで、アメリカ、日本、カナダ、オーストラリア、ニュージーランド、ロシアなどがこれに含まれる)の間で意見の相違が大きく、最終的な合意を得ることができなかった。また2001年になって米国が京都議定書からの離脱を表明するなど、その実現性については不確定な要因も多い。なお、COP6は2001年の7月に再度COP6 Part2として開催される予定である。

内航船舶から発生する温室効果ガスは、各国の国内排出量として排出量削減対策の対象となるが、内航海運に対して総量に関する削減目標などが設定されている国の例は現状では存在しない。日本国においては、平成12年の環境省「地球温暖化防止対策の在り方の検討に係る小委員会」報告書内において、鉄道と航空機の輸送エネルギー効率の改善目標を7%に置いているのに対して、船舶の輸送エネルギー効率の改善目標は3%に置かれているが、平成12年に行われた最新の将来予測では、内航船舶の輸送エネルギー効率は将来に渡って変化しないものとして計算されている(平成13年環境省; 温室効果ガス削減技術シナリオ策定調査検討会報告書)。つまり、日本国においても内航船舶に対しては総量での削減目標が設定されておらず、かつ輸送エネルギー効率に関する改善目標も他の交通機関と比較しても低く設定されていることがわかる。

一方、外航船舶から発生するCO<sub>2</sub>等の温室効果ガスの排出削減の方策については、京都議定書第二条において以下のように国際機関の役割が盛り込まれており、その後のCOPもしくはSBSTA(科学上及び技術上の助言に関する補助機関会合)の席上において国際海事機関(IMO)で国際的に検討することが要請されている。

## 京都議定書第2条

1. 附属書 の締約国は、第3条に規定する数量的な排出抑制及び削減の約束の履行に当たり、持続可能な開発を促進するために、次のことを行う。(以下略)
2. 附属書 の締約国は、国際民間航空機関及び国際海事機関を通じて作業を行い、それぞれ、航空機燃料及びバンカー油から排出される温室効果ガス(モントリオール議定書によって規制されているものを除く。)の抑制又は削減を検討しなければならない。

## 6.2 国際運輸部門の論議

上記のように、国際海運については国際海事機関(IMO)に、国際航空輸送については国際民間航空機関(ICAO)に削減方法の調査・検討が求められている。ここでは、外航船舶に関係のあるIMOの動向を中心に示した。

### 6.2.1 国際海事機関(IMO)における論議

IMOにおける温室効果ガスの本格的な議論は、1999年3月の海洋環境保護委員会(MEPC44)から開始された。シップ・アンド・オーシャン財団は外航船からの温室効果ガスの排出に関する議論にMEPC44以来参加しており、本調査で得られた成果の一部も提出してきた。以下に、各会合の概要を示す。

#### (1) 第44回海洋環境保護委員会(MEPC44; 1999年4月開催)

本会合では、COP5において外航船舶から排出される地球温暖化ガスの現状把握と削減オプションの検討がIMOに対して正式に要請されたこと、これに対応するためにIMOが調査委託したコンサルタントレポートの中間報告が提出され、次回のMEPC45において最終報告書の内容が紹介されること、等が事務局から報告された。これに対してパナマ、エクアドルなど複数のUNFCCC非加盟国から経済的なインセンティブの導入に対する反対意見等が述べられたものの、ともかく本会合から外航船舶からの温室効果ガスの排出量に関する論議が実質的に開始されることになった。

シップ・アンド・オーシャン財団は、同会合にタンカーからのCO<sub>2</sub>排出量とその将来予測に関する技術レポートを提出した(MEPC44/INF10)。主な発表内容は以下のとおりである。

- 原油タンカーによるCO<sub>2</sub>排出量が外航海運全体の排出量に占める割合は約26%であり、コンサルタントレポートの中間報告結果とほぼ一致している。
- 船腹代替の効果により、2010年における原油タンカーからのCO<sub>2</sub>排出量は1990年に比べて大きな変化はないと予想される。
- 今後、他の船種、温室効果ガスについて調査を行う予定である。
- 一層の情報交換が必要である。

(2) 第45回海洋環境保護委員会(MEPC45; 2000年10月開催)

第45回海洋環境保護委員会(MEPC45)において、船舶からの温室効果ガスの削減に関するIMOでの技術的な検討結果が期待されていることが、同年9月にフランスのリヨンで開催されたSBSTA13(第13回科学上及び技術上の助言に関する補助機関会合)において表明されたこと、UNFCCC事務局とIMOとが密接に協力して作業を進めること、などがIMO事務局より報告された。

また、IMOが調査委託したコンサルタントからの温室効果ガスに関する最終調査レポート(MEPC45/8 以下、コンサルタントレポート)が提出されたことが議長より報告された。今後のIMOにおける温室効果ガス関連議題の検討の際に、コンサルタントレポートを基礎資料として用いることとされ、各国は次回MEPC46までに同レポートに関するコメントを提出するよう要請があった。

シップ・アンド・オーシャン財団はコンサルタントレポートとは別に研究発表を行った(MEPC45/INF27)。日本政府代表団は財団の研究内容をIMOにおける今後の検討に反映するように要請した。特にコンサルタントレポートが取り扱っていないCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスについては、IMO事務局大気汚染関連担当者から大きな期待が寄せられた。

以下に両者の報告数値の差異について簡単に分析する。

コンサルタントレポート(MEPC45/8)とシップ・アンド・オーシャン財団調査(MEPC45/INF27)との調査内容比較

- 年間のCO<sub>2</sub>総排出量は、コンサルタントレポートが4.4億トンであったのに対し、財団調査では3.6億トンであった。これは使用した統計資料の違いが主な理由である。
- 船種別の割合は、タンカーでほぼ同一なのに対して、バルカー及びコンテナで大きな差が見られた。
- 細かく見ると、コンサルタントレポートは現存する船がすべて動くと仮定し排出係数を乗じているが、財団調査では船の運航実態(航行日数)から推定している。
- 削減技術の評価項目及びその効果については大きな違いはなかった。
- CO<sub>2</sub>の将来予測については、20年後に財団調査が3%増に対してコンサルタントレポートでは38%増と大きな違いがあった。この差違は財団調査が船の更新による輸送エネルギー効率の向上効果を考慮しているのに対し、コンサルタントレポートではそのような効果は考慮していないためと考えられた。
- CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガス(CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oなど)の排出量の寄与は、財団調査ではCO<sub>2</sub>排出量の5%程度と推定しているが、コンサルタントレポートでは調査対象になっていない。

MEPC45における議論

コンサルタントレポートに関しては、日本国より、N<sub>2</sub>O、HFCsなどのCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスもIMOからUNFCCCへの提出文章の中に含まれるべきであること、減速航行などの実行上社会経済的に影響の大きい削減手法については慎重な議論がなされるべきであり、

IMOにおける検討はハード技術面の削減手法を中心に行われるべきであること、 シップ・アンド・オーシャン財団が行った調査研究などその他の研究もIMOの研究成果の中に反映されるべきであることの3点が意見として述べられた。

また、イギリスからは、減速航行等のオペレーショナルな削減手法及び炭素税などの市場経済的な削減手法については慎重に調査すべきであるとのコメントがあり、さらに不確定性の多いバンカー油の払い出し量を必要以上に大きく見積もらないこととコメントがあり、ノルウェーがこれを支持した。

(3) 第6回ばら積み液体と気体物質に関する小委員会(BLG6; 2001年2月開催)

MSC(海上安全委員会)の下部委員会である「ばら積み液体と気体物質に関する小委員会(BLG; Sub-Committee on Bulk Liquids and Gases)」において、MEPC45からCO<sub>2</sub>排出量削減策の技術的な検討を行うように要請されたことを受け、コンサルタントレポート(BLG6/12)について論議がなされた。

小委員会としては以下のような各論及び指摘を併記してMEPC46へ報告した。

なお、シップ・アンド・オーシャン財団は、外航船舶からのCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガス(CO<sub>2</sub>の約5%と見積もられる旨)の排出について説明を実施した。

- コンサルレポートはよくできており、今後の政策的議論のベースになるものである。
- シップ・アンド・オーシャン財団のCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスについての研究(BLG 6/12/1)も考慮に入れるべきである。
- IMOとしてのポリシーを決定する際には、MEPC以外のMSCなど他の委員会の協力が必要である。
- 短期的な技術対策はボランティアベースで行われるべきである。
- 長期的な技術対策の導入は、十分な効果やコストの検討後に行われるべきである。
- 温室効果ガスの削減には、技術的対策、運航上の対策、市場原理による対策の三つが上げられるが、後二者はその実現が困難である。一方で、ボランティアベースでは、排出インデックスのように実現できるかもしれない。
- 燃料消費量の正確な統計が必要である。
- 船上でのCO<sub>2</sub>排出濃度モニタリングの必要がある。

(4) 第46回海洋環境保護委員会(MEPC46; 2001年4月開催)

2001年4月に開催された第46回海洋環境保護委員会(MEPC46)では、事務局からBLG6の審議結果(MEPC46/10)が報告された。日本国は外航船舶から排出される温室効果ガス削減問題についてはIMOが積極的に貢献するべきであること、及び次の会合(MEPC47:2002年3月開催予定)からワーキンググループを設置し検討をすべきと主張し、各国からの支持を受けた。ワーキンググループの設置は最終的に合意され、MEPC47から本格的な活動が開始される運びとなった。

同会合にはノルウェーより、MEPC46/INF9 が提出された。これによると、外航船舶の運航に伴う温室効果ガスに対して総量枠を設けることは、国別の割り当て方法など考慮すると困難であるとしている。また技術的な対策技術の強制措置といった方策だけで同ガスの削減を図ることは困難であり、市場原理に基づく方策の導入が必要であるとしている。その具体的方策として、排出基準値を設定した上でのボランタリーな削減、CDM<sup>25</sup>及び船舶間での排出権取引などをあげている。

#### 6.2.2 国際民間航空機関(ICAO)における論議

2001年1月に開催されたICAOの第五回CAEP(航空環境保全委員会)では、削減手法について、技術的(航空機エンジンの燃費改善など)、運航的(運航経路等の変更など)、経済的(市場メカニズムの導入など)の三つの観点から既に議論が行われている。経済的な削減手法の議論では、ボランタリーな措置、排出権取引、課徴金や税制の制度の導入といったアイテムも議論にあがっている。

---

<sup>25</sup> CDM(クリーン開発メカニズムClean Development Mechanism);UNFCCCにおいて規定されている技術援助の考え方で、地球温暖化防止のために、条約締結国が有する技術・ノウハウ・資金などを、非締結国に提供することで、全体としてのCO<sub>2</sub>削減を目指すものである。京都議定書においてその目的は、「途上国が持続可能な発展を達成すると共に、気候変動枠組条約の究極の目的に貢献するよう支援し、先進国が温室効果ガスの削減目標を達成することを支援すること」とされており、そのため、先進国は、途上国における事業による温室効果ガス削減量を目標達成に算入することができるとされている(京都議定書第12条)。

## 7 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>など温室効果ガスの削減に向けての提言

本章においては前章までの調査検討結果を総括した上で、外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>など温室効果ガスの削減に向けての提言をまとめる。

### 7.1 外航船舶の運航に伴い排出されるCO<sub>2</sub>など温室効果ガス量の現状と将来予測

#### 7.1.1 CO<sub>2</sub>排出量

表 7.1-1に、全世界、外航船舶及びOECD主要各国の1995年時点でのCO<sub>2</sub>排出量推定値を示した。オークリッジ研究所が算出した全世界のCO<sub>2</sub>排出量を基準にすると、外航船舶は全世界でのCO<sub>2</sub>排出量の1.7%程度を占めるものと考えられる。これを各国別の排出量と比較すると、外航船舶からの排出量はフランス一国からのCO<sub>2</sub>排出量にほぼ相当するものである。

表 7.1-1 世界におけるCO<sub>2</sub>排出量の比較(1995年)

区分		CO <sub>2</sub> 排出量 (10 <sup>6</sup> トン)	全世界に占める割合(%)
全世界の総排出量		23,503	-
外航船舶由来の排出量		394.7	1.7
主要国の CO <sub>2</sub> 排出量	米国	5,214	22.2
	日本	1,218	5.2
	スウェーデン	585	2.5
	英国	581	2.5
	カナダ	499.7	2.1
	フランス	385	1.6

シップ・アンド・オーシャン財団平成 11 年度調査による。各国の数値は IPCC へ提供されたもの。全世界の排出量は米国オークリッジ研究所二酸化炭素情報解析センターのもの

船種別のCO<sub>2</sub>排出量の割合は本調査結果によれば表 7.1-2に示すとおりであり、タンカー、バルカー、コンテナのそれぞれがおよそ1/3ずつを占めている。細かい算定方法などについては、1章を参照されたい。

表 7.1-2 船種ごとの燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量(1997年)

区分		年間輸送総量 (10 <sup>9</sup> トンマイル)	燃料消費量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	CO <sub>2</sub> 排出量 (10 <sup>6</sup> t-CO <sub>2</sub> /年)	比率
タンカー	原油	9,321	26	78	21%
	石油製品	2,289	9	28	7%
	計	11,610	35	105	28%
バルカー	鉄鉱石運搬船	2,520	16	47	13%
	石炭運搬船	2,359	17	50	13%
	その他	1,365	5	14	4%
	計	6,245	37	111	30%
コンテナ船		352 × 10 <sup>9</sup> TEU マイル	45	135	36%
総計		-	124	373	100%

燃料消費量から CO<sub>2</sub> 排出量への換算には、CO<sub>2</sub> 排出係数 2,999g-CO<sub>2</sub>/kg-Fuel を用いた。総計には不確定分が含まれるため、船種の合計とは一致しない。四捨五入のため端数が一致しない場合がある。

### 7.1.2 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>排出量の将来予測

外航船舶から排出される温室効果ガスのうち、95%以上を占めるCO<sub>2</sub>は燃料の燃焼によって生じる。従って、CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスへの対処も勿論必要であるが、まずは燃料の燃焼由来のCO<sub>2</sub>排出量の将来動向を把握し、対処を進める必要がある。

外航海運の荷動きは、コンテナ貨物割合の増加や、専用船で運搬される貨物割合の増加など、輸送形態の変化はあるものの、総量としては過去10年間にわたって年数%の割合で直線的に増加してきた。これは、世界全体の経済成長に伴い、国際貿易が逐次拡大してきていることに起因する。

今後20年間程度をみると、既に先進諸国は安定成長に入っている一方で、発展途上国における経済成長が見込まれており、これに伴って経済成長率にほぼ見合う形で、外航船舶による輸送量も増加傾向が継続すると考えられている。

このような考え方にに基づき、今年度調査においては造船業基盤整備事業協会がダブルハル化による船舶需給量等への影響評価を行った調査において用いた貨物量の伸び(1997年の輸送総量に対してタンカー:2.3%/年、バルカー:1.8%/年、コンテナ:2.8%/年相当)をもとに、CO<sub>2</sub>排出量の将来予測を行った。

ただし、タンカーによる原油輸送については約20年後には原油埋蔵量の底が見えてくる可能性があることや、先進国の省エネルギー施策の効果、あるいはわが国などが積極的に進めている原油からLNGへの基幹エネルギーの転換など、構造的な変化が進むことで、その輸送量が減少または頭打ちになって行く可能性があることも考慮して、輸送量の伸びが低めに推移した場合(lower case)として年1.0%相当を用いた予測も行った。これは、世銀などによる2000年代前半の世界経済成長率が2%であることをもとに、上述の原油輸送量減少の可能性も考慮して設定したものであり、同時に過去5年間の原油輸送量の平均的な伸び率でもある。なおLNG輸送については、今後大幅な増加も想定されるが、元々タンカーによるウェットバルク全体での輸送量に占める割合が小さいため、10年あるいは20年後に占める割合もそれほど大きくならないこと、その伸び率はパイプラインの敷設状況に大きく影響される可能性があることから、ここでは特に分けて扱うことはしなかった。

バルカーについては、大きな構造変化の要素が少ないこと、過去5年間のトレンドと既存の数値に大きな差異がないことなどから、単一のケースとして固定した。また、石炭輸送については、各国の環境保全施策(CO<sub>2</sub>及びSO<sub>x</sub>対策)の進展の中で消費量が低下する(輸送量が伸びない)可能性もあるが、一方で石炭ガス化技術に伴って消費量が伸びる(輸送量が低下しない)という考え方もある。

最後に、コンテナ輸送については、経済のグローバル化の中での製品輸送、半製品輸送の増加に伴い、今後大きく増加する可能性があるとの見方もある。とりわけ、中国のWTO加盟に伴い中国向け農産品の輸出が大幅増となる可能性があること、さらに東欧、アジア、中南米の市場開放に伴う機械、部品の輸入増、これら地域からの完成品の輸出増が、輸送量の伸びに大きな影響をもたらす可能性がある。事実、過去5年間の全世界のコンテナ取扱量は年6%程度の伸びを示している。このような背景を考慮すると、前出の2.8%/

年相当という伸び率は控えめな予測となっている可能性があることから、タンカーとは逆に、輸送量の伸びが高めに推移した場合(upper case)として、至近5年間の平均伸び率である6%/年相当を用いることとした。

以上の結果、タンカー及びコンテナについては、輸送量の将来伸び率をupper caseとlower caseで設定し(表 7.1-3)、バルカーは将来伸び率を一定として、CO<sub>2</sub>排出量の将来予測を行った。

予測結果は表 7.1-4に示す通りで、upper caseで75%程度、lower caseで40%程度の燃料消費量及びCO<sub>2</sub>排出量の伸びが予想される。また、表 7.1-2に示すように船種別に燃料消費量の伸び率を見ると、コンテナ運航に伴うCO<sub>2</sub>排出量の伸びがタンカー・バルカーの伸び率に比較して高く、総燃料消費量に大きく影響していることがわかる。従って、地球温暖化防止を考える場合コンテナ運航を重視した方策の検討が必要であろう。なお、この予測結果には高船齢タンカーのフェーズアウト規則(MARPOL条約13G規則)の効果を含めている。他の船種については現状のペースでの更新が進むものと仮定した。

表 7.1-3 各ケースにおける年増加量の1997年に対する伸び率

ケース	タンカー	バルカー	コンテナ	年間平均伸び率
upper case	2.3%	1.8%	6.0%	3.4%
lower case	1.0%	1.8%	2.8%	1.8%

各荷種の2000～2020年までの1970年に対する平均年伸び率を示す

表 7.1-4 1997年と2020年における輸送総量とCO<sub>2</sub>排出量の比較

ケース	外航海運の 輸送総量 (10 <sup>9</sup> トンマイル/年)	外航海運の 燃料消費量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	外航海運の CO <sub>2</sub> 総排出量 (10 <sup>6</sup> t-CO <sub>2</sub> /年)	単位貨物量当りの CO <sub>2</sub> 排出量 (kg-CO <sub>2</sub> /トンマイル)	
1997年(a)	25,948	124	373	0.0144	
2020年 (b)	upper case	45,364	217	650	0.0143
	lower case	35,975	172	516	0.0143
b/a-1	upper case	74.8 %	74.2 %	74.2 %	-0.4 %
	lower case	38.6 %	38.3 %	38.3 %	-0.2 %

不明分の燃料消費量を含む

表 7.1-5 船種ごとにみた2020年における外航船舶の燃料消費量の伸び率と構成比率

	1997年		2020年					
	燃料消費量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	構成比率	lower case			upper case		
			燃料消費量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	1997年に 対する伸び率	構成比率	燃料消費量 (10 <sup>6</sup> t-Fuel/年)	1997年に 対する伸び率	構成比率
タンカー	49	28%	39	11%	23%	49	39%	23%
バルカー	49	30%	49	33%	28%	49	33%	23%
コンテナ船	105	36%	74	64%	43%	105	134%	48%
不明分	13	6%	10	38%	6%	13	84%	6%
合計	217	100%	172	38%	100%	217	74%	100%

### 7.1.3 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの排出

外航船舶の運航に伴いCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスも排出される。京都議定書ではCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスとして表 7.1-6に示す5物質が削減対象とされた。このうち、外航船舶の運航に伴いある程度の排出量が予測されるのは、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、HFCsの3物質である。

本調査では、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>Oに関する実船での排出濃度測定結果などをもとに、外航船舶の運航に伴う排出量を推定した。このような試算は世界でも今まで例がなく、今回初めての試みである。一方、HFCsについては、冷凍・冷蔵コンテナ数やそれに使用されている冷媒の世界的な供給量は統計資料が存在しないため、漏洩量あるいは排出量を正確に見積もることはできないが、聞き取りなどをもとに一定の仮定のもとで排出量を概算した。

表 7.1-6 CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの主な排出源

物質名	陸上での主な排出源など	船舶運航からの主な排出経路
CO <sub>2</sub> (二酸化炭素)	燃料の燃焼	燃料の燃焼
CH <sub>4</sub> (メタン)	農業、ゴミ廃棄物の腐敗により自然排出する	燃料の未燃焼分、原油などの移動時に荷室より蒸発漏洩する
N <sub>2</sub> O (一酸化二窒素)	アジピン酸生成の副生物、燃焼未燃分。	燃料の未燃焼分(窒素酸化物のごく一部分として排出される)
HFCs (ハイドロフルオロカーボン)	冷蔵設備からの自然漏洩、工業過程での使用時に漏洩する。	冷凍船及び冷蔵・冷凍コンテナの冷媒が自然漏洩する。
PFCs (パーフルオロカーボン)	消火剤	-
SF <sub>6</sub> (六ふっ化イオウ)	高電圧回路などの絶縁ガス 半導体製造プロセスなど	-

これによると、CO<sub>2</sub>換算でみた場合、上記3物質合計で外航船舶から排出される温室効果ガス全体の4%程度になる可能性があると考えられた(表 7.1-7)。とりわけHFCsについては、モントリオール議定書対象物質の削減前倒しによる代替フロン使用量の増大と、加工食品輸送の増加により冷蔵・冷凍コンテナの流通量が今後大きく伸びる可能性があることを考え合わせると、将来の排出量は相対的に増大する可能性が大きく、その排出量の正確な把握及び削減方策検討が今後一層重要な課題になるものと考えられる。

以上の結果、排出量はCO<sub>2</sub>に比較して小さいものの、CO<sub>2</sub>以外の3物質についても適切な措置を講ずることにより、外航船舶から排出される温室効果ガスの数%が削減可能であると考えられる。なお、積み荷時、揚げ荷時に原油ガスとして排出されるCH<sub>4</sub>や、冷凍・冷蔵コンテナの陸上での輸送中及びメンテナンスの際に漏洩するHFCsの排出量を「外航船舶の運航に伴う」排出量と考えるべきかどうか慎重な検討が必要であろう。従って、これらの排出量算定ならびに対策のあり方などについては、陸上側との調整及び協調が必要である。

表 7.1-7 外航船舶の運航に伴う温室効果ガス排出概算値(1997年ベース)

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFCs
温暖化係数	1	21	310	1,700
船舶からの排出量(10 <sup>3</sup> t)	373,100	175.2	10.0	(3.1-5.1)
CO <sub>2</sub> 換算値(10 <sup>6</sup> t)	373.1	3.7	3.1	(5.2-8.7)
温室効果ガス排出量合計値(10 <sup>6</sup> t)	385.1-388.6			
温室効果ガス排出量に占める割合	96.0-97.0%	1.0%	0.8%	1.2-2.2%

CO<sub>2</sub>以外の3ガス排出量は試算であり、また港湾荷役時あるいはふ頭上での排出量を含む。

## 7.2 温室効果ガスの排出削減方策及び提言

### 7.2.1 評価基準の設定

外航船舶運航に伴う温室効果ガスの削減問題はIMOで議論が始まったばかりであり、目標とすべき削減率などは設定されていない。しかし、気候変動枠組条約の本来の趣旨からすれば、外航船舶運航に伴う温室効果ガス排出量の削減についても評価ができるような何らかの基準を設定し、これに向けて削減対策に取り組んでいくことが望ましい。

そこで、ここでは下記のような2段階の評価基準を設定し、CO<sub>2</sub>排出量削減方策の効果などを検討することとした。

#### 第1評価基準(必要レベルとして)

2020年までに、単位輸送量当たりの外航船舶の運航に伴う温室効果ガス排出量(又は輸送エネルギー効率)を1997年に対して6%以上の削減を目指す。これは、外航船舶の運航に伴う温室効果ガス排出量の総量を6%以上削減するという下記の第2評価基準レベルへ到達するために最低限の条件である。

#### 第2評価基準(十分レベルとして)

2020年までに、外航船舶の運航に伴う温室効果ガス総排出量を1997年に対して6%以上削減を目指す。これは、わが国を含む先進諸国の陸上発生源からの温室効果ガス削減目標にほぼ見合うレベルとして設定するものである。

必要レベルである輸送エネルギー効率の向上の達成が十分であれば、燃料費が輸送コストの大半を占める外航海運輸では輸送コスト自体の減少を引き起こし、新たな輸送需要の掘り起こしや他の輸送部門からの輸送量の振替が生じる可能性がある。

そうなると第2評価基準である十分レベルの達成は覚束なくなるが、その場合にも、世界の輸送部門全体での温室効果ガス排出総量の削減に寄与することになり、結果として地球温暖化防止という最終目標達成に向うことができると考えた。

従って、ここではまず、上記の第1評価基準(輸送エネルギー効率の6%以上の向上)を目指すものと考え、さらに上位のレベルとして排出総量の6%以上の削減を目指すこととした。

### 7.2.2 外航船舶の運航に伴う温室効果ガス排出量削減方策の検討及び提言

ここでは、短期的(概ね2010年頃までに実施可能)、中期的(概ね2010年以降に実施可能)、長期的(実施にはさらに長期的な開発検討が必要)の3つに区分して、外航船舶からの温室効果ガスの削減方策及びその効果について検討し、将来に必要な技術開発や国際的に検討すべき課題を含めての提言について考察を行った。

なお、以下に掲げる削減方策のうち幾つかのものについて、その効果を定量的に把握するためにCO<sub>2</sub>排出量及び輸送エネルギー効率の試算を行った結果を表 7.2-1に示した。これらの試算は、それぞれのケースについて一定の仮定を置いて将来予測を行ったいわば上記評価基準に対しての「効果の目安」である。計算上の仮定や試算結果の詳細については付録3

を参照されたい。

ゼロオプションは、何ら対策を講じなかった場合であり、4章のCO<sub>2</sub>排出量の将来予測及び表 7.1-4に示した結果に相当するものである。

対策1は、高船齢船の早期代替を促進し、輸送エネルギー効率の改善が図られた新造船を導入することによりCO<sub>2</sub>の削減を図ろうとするものである(本章(1) 参照)。

対策2は、短期的に導入可能な削減技術(例えばPBCFなどの推進器改良技術)を全船舶(既存船についてもレトロフィットを行う)に適用した場合である。本試算においては、これらの技術による燃料消費量の削減割合を5%と仮定している(本章(2) 参照)。

対策3は、減速航行を行った場合であり、本試算においてはコンテナ船20%、タンカー及びバルカーは10%の減速を行うと仮定している(本章(1) 参照)。

対策4は、ほぼ10年後に導入が想定される削減技術(燃料転換、マイクロバブルなど)を新造船に対してのみ適用した場合であり、本試算においては、これらの技術による燃料消費量の削減割合を15%と仮定している(本章(2) 参照)。

表 7.2-1 外航船舶の運航に伴うCO<sub>2</sub>排出量に関する将来予測結果(1997年に対する2020年での増加率)

[ upper case(伸び率、タンカー:2.3%相当、バルカー:1.8%相当、コンテナ:6.0%相当) ]

CO <sub>2</sub> 排出削減方策の内容	CO <sub>2</sub> 排出量の増加率	輸送エネルギー効率の改善幅	
		ゼロオプションに対する増分	ゼロオプションに対する改善
ゼロオプション 貨物量の増加+現状ペースでの高船齢船の代替	74.2%		0.4%
対策 1; 短期的削減方策 (高船齢船の早期代替)	73.5%	-0.6%	0.7%
対策 2; 短期的削減方策 (改良推進器の普及など)	65.4%	-8.7%	3.3%
対策 3; 短期的削減方策 (減速航行)	25.3%	-48.9%	28.3%
対策 4; 中期的削減方策 (燃料転換及び粘性抵抗の低下技術の開発など)	68.2%	-5.9%	3.8%

[ lower case(伸び率、タンカー:1.0%相当、バルカー:1.8%相当、コンテナ:2.8%相当) ]

CO <sub>2</sub> 排出削減対策	CO <sub>2</sub> 排出量の増加率	輸送エネルギー効率の改善幅	
		ゼロオプションに対する増分	ゼロオプションに対する改善
ゼロオプション 貨物量の増加+現状ペースでの高船齢船の代替	38.3%		0.2%
対策 1; 短期的削減方策 (高船齢船の早期代替)	37.7%	-0.6%	0.7%
対策 2; 短期的削減方策 (改良推進器の普及など)	31.4%	-6.9%	3.8%
対策 3; 短期的削減方策 (減速航行)	1.3%	-37.0%	26.9%
対策 4; 中期的削減方策 (燃料転換及び粘性抵抗の低下技術の開発など)	32.4%	-5.9%	4.5%

## (1) 短期的削減方策

ここでは、概ね2010年頃までに実施可能なものを「短期的削減方策」と位置付け、新造船への早期代替、推進器に対する改良技術の広範な普及、CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの排出削減、船舶の大型化及び減速航行を挙げる。

### 輸送エネルギー効率の良い新造船への早期代替

輸送量あたりの燃料消費量である輸送エネルギー効率は、運航業者のコスト削減の対象として、その改善にはこれまで多くの努力が払われてきた。船舶はもともと大量輸送機関としての優秀性があり、内航海運の平均的な輸送エネルギー効率は営業用トラック輸送のおよそ 1/5 程度、外航海運では航空輸送はもちろん全ての陸上輸送に比べて圧倒的に輸送エネルギー効率が高い。

輸送エネルギー効率は、輸送の高速化などの要因により 1980 年代半ば以降は横ばいあるいは若干悪化しているが、それ以前は 1980 年代までおしなべて大幅な改善がみられ、1970 年代初頭に比べると概ね 20% 程度の効率向上がみられる。これには機関、船型の改良など燃料消費量削減技術の開発普及が最も大きく寄与しているが、コンテナ輸送や専用船化などによる荷役効率の向上も寄与している。

船舶の経済寿命は比較的長く、現時点でも 1970 年代あるいはそれ以前に建造された輸送エネルギー効率の悪い船舶も就航していることを考慮すると、これらの高船齢船を効率の良い船舶に早期に代替することが考えられる。

早期代替の効果については次のように見積もられた。

タンカーでは、ゼロオプションにおいてすでに早期代替を見込んでいる(MALPOL 条約 13G 規則に従う)ため、削減効果はない。一方、バルカー及びコンテナ船では、2010 年前後まではゼロオプションに比べて燃料消費量(=CO<sub>2</sub> 排出量)が減少すると考えられ、その効果は数～5%程度と見込まれた。しかしながら、高船齢船の代替が 1 サイクル終了した後は、改善効果は生じないため、その後は輸送総量の伸びに応じて燃料消費量が増加しつづける。2010 年代後半にはゼロオプションにおいても高船齢船の代替が追いつくため、2020 年での効果を見ると(対策 1:表 7.2-1参照)、輸送エネルギー効率の改善はわずか 0.4%にとどまり、第 1 評価基準のレベル達成には遠く及ばない。また、CO<sub>2</sub> 排出量はゼロオプションに比べて 0.6%の削減であり、1997 年に比べれば upper case で約 74%の増加、lower case で約 38%の増加になるものと見込まれた。

### 輸送エネルギー効率改善技術の導入

#### (推進器に対する改良技術の広範な普及)

短期的に導入可能な燃費改善技術として、機関の熱効率の向上、船体の改善による造波抵抗及び粘性抵抗の減少、推進器の効率上昇、などの要素技術を 5.1.3 節において検討し、削減効果、導入コスト、適用範囲の広さなどから、有望な技術を抽出した。

その結果、機関の熱効率については、現在は NO<sub>x</sub> や低質燃料への対応が主体となっており、近い将来に大きな改善は望めないと予想された。同様に、船体の改善による造波

及び粘性抵抗の低減も、CFDなどの新技術の改善が進んでいるが、その適用は事実上新造船に限られると考えられた。一方、推進器に対する改良技術については、中型船ではPBCF、フェリーなど一部の高速短距離船ではCPP、大型船ではコントラプロペラ等の技術が実用化されつつあり、短期的技術として有望であると考えられた。特に、PBCFは船型の適用範囲が広く、レトロフィットも比較的容易であり、新造船か既存船かに関わらず輸送エネルギー効率の改善が得られる点で有望であると考えられた。価格的には船体価格の10%以内で設置できるものであり、コスト回収も比較的容易であると考えられる。適用の試算結果を表 7.2-2に示した。

表 7.2-2 推進器に対する改良技術の適用試算結果

方策(技術)	満載時のエネルギー効率上昇分(%)	バラスト時のエネルギー効率上昇分(%)	改造費(円)	改造のための入渠期間(日)	回収期間(年)
PBCF	6	5	3,500万	2	4
ダクトプロペラ	10	8	8,600万	15	9
コントラプロペラ	9	8	14,300万	25	10
CPP	3	4	5,200万	15	15

長さ 240m、Cb 値 0.80 のタンカーへの適用計算例。

Marine Report No.23(1996年6月)より作成

これら短期的技術による平均的なCO<sub>2</sub>削減効果は概ね5%程度であり、これを全船舶に適用したと仮定すると、2020年における輸送エネルギー効率は、ゼロオプションに比べて3%強の改善が、同じくCO<sub>2</sub>排出量は7~9%程度削減されるものと考えられた。ただし、削減効果を上回る貨物量の伸びの結果、1997年と比較した2020年のCO<sub>2</sub>排出量は、upper caseの場合には約65%、lower caseの場合でも約30%も増加すると予測された(対策2:表 7.2-1参照)。

#### CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの排出削減

排出量はCO<sub>2</sub>換算で $12 \times 10^6$ tと少ないものの(外航船舶から排出される温室効果ガスとして全体の4%程度と試算される)、CH<sub>4</sub>、HFCsなど、CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスに対する対策も短期的対策として視野に入れる必要がある。7.1.3で述べたように、その全量を船舶運航の排出量とするのが適切なのか、という仕分けの問題等もあるが、排出起源のアロケート問題をひとまず横に置いた場合、これらの物質については具体的な対応策が採りやすい側面があり、地球全体での温室効果ガス削減という観点からは、早急に何らかの取組みを開始すべきと考えられる。

例えば、原油をタンカーに積み込む際に排出されるCH<sub>4</sub>はこれを陸上側施設で燃焼処理することにより大きく削減できる。LNG船と同様のクローズドカーゴシステムは、既に一部の国では採用されており、国内の原油備蓄基地など陸側施設への普及が待たれるところである。

さらに、冷凍船や冷蔵・冷凍コンテナに用いられるフロン・代替フロン等の冷媒の漏洩問題がある。フロン類(HCFCs)はオゾン層破壊の原因物質となることが明らかになり、

1987年のモントリオール議定書によりその製造禁止が決定した。フロン使用禁止に伴い開発されたのが、分子中に塩素原子を含まないいわゆる代替フロン(HFCs)であったが、これも HCFCs 並でないものの大きな温室効果を持つことが確認されており、陸上ではその使用に際して漏洩・廃棄対策などの管理体制が整いつつある。冷凍コンテナを含む船舶の冷凍施設からの HFCs についても、再充てんの際の過充てんの防止、積み下ろしの際の慎重な取扱による破損等の防止、廃棄時における冷媒の全量回収などを徹底することにより、その漏洩量の削減は可能である。

これら CO<sub>2</sub> 以外の温室効果ガスへの対策により、仮に相当量の漏洩を防止できれば、CO<sub>2</sub> 排出量に換算して 2% に近い削減効果が見込める可能性もある。

#### 船舶の大型化

船型の大型化は、原油タンカーでは過去において目指された大きな技術トレンドであり、1975年の日精丸(484,337 DWT)や 1980年の Jahre Viking(555,819 DWT)など過去には ULCC が建造された。しかしながら、近年はこのような ULCC クラスの超大型タンカーは建造されておらず、VLCC 級やスエズマックス級のタンカーに需要は移行してきた。これは、先物市場が発達している原油の場合、大規模なベイロードによる輸送において大きな価格下落があった場合に、買い手にとって大きな損失につながる可能性があることから、経済的に適正なサイズの輸送が指向されていることや、マラッカ海峡やスエズ・パナマ運河など地峡の制限要因 などによる。今後 10 年で 1970 年代に建造された大型 ULCC や VLCC の解撤が進む事になるが、この場合も VLCC 級やスエズマックス級タンカーへの置き換えが進むものと考えられる。ただし、LNG 船、LPG 船、重油などの石油製品タンカーについては今後輸送量が大きく伸びる可能性もある。特に LNG 船では陸上パイプライン敷設計画の遅れがあれば、海上輸送量の大きな伸びとともに大型化が志向される可能性が残されている。また石炭液化技術が軌道に乗れば、これにより生成された DME などの液化燃料を運搬する大型プロダクトタンカーの出現の可能性もある。

ドライバルクについては、原料の輸送については専用船化が進んでいるが、顕著な大型化の傾向は現在は見られない。

一方、コンテナ船では大型化の傾向が顕著である。現存コンテナ船の船型・船齢構成(表 1.2-7)をみると、1980 年代半ば以降、4,000TEU/隻以上の大型船が建造され、その後も建造・就航が続いていることに加えて、1,000TEU/隻未満の小型船の建造数は減少し、1,000~4,000TEU/隻の船舶が増加している。最近のロイズリストの記事によれば 25knt の運航速度条件下で 40ft コンテナのロツテルダム - シンガポールの料金を試算すると、現行の搭載可能量 6,800TEU/隻程度の大型コンテナ船から 8,800 TEU/隻の超大型コンテナ船へシフトすれば、12%のコスト削減が可能としている。更に 12,500TEU/隻のコンテナ船へのシフトを行えば、たとえそれが二軸船であっても 9%以上のコスト削減につながるとしている。

従来、搭載可能量 9,000 TEU/隻以上の大型コンテナ船が 23knt 以上で運航するために

は、一軸船から二軸船への設計の大幅変更が必要となりイニシャルコスト及びランニングコストの大幅な増加につながると言われきた。しかし最近ではコントラプロペラあるいはアジポッドなどの推進器との組み合わせにより、従来どおり一軸で実用化する開発動向も報道されており、コンテナ船の大型化が更に一段階進む事も予想される。

ただし、コンテナ船の大型化は同時に港湾施設及び周辺施設の改修を必要とする。これは、先進国等で既に大型港湾施設を持っている場合であっても、陸上への荷捌きも含めた荷役作業が隘路となるケースがあるためである。コンテナ大型化は、大水深バースに加え、ターミナル面積の増大、ガントリークレーンの基数と規模の拡大、深夜開港などをふ頭側に要求することになる。特に、わが国の場合、バックヤードの狭さという物理的な問題に加え、24時間荷役作業化の遅れ、陸上側輸送体制の40ftおよび45ftコンテナへの対応遅れ、船社専用を原則にしている公社管理のあり方など、NIES諸国や米国と比較してコンテナふ頭の整備や管理方法やコスト負担について遅れがあることは否めない。

さらに、国際コンテナ輸送はハブ港間の大口輸送と最終消費地もしくは生産地との小口輸送の二極化が進むと考えられているが、多くの発展途上国においては、国際貿易に対応していくための港湾施設インフラの整備に今後は多大なコストをかけなければならないという問題を引き起こすことも考えられる。

船舶の大型化は、一般的に輸送エネルギー効率の向上をもたらすものであるから、温室効果ガス対策として効果のある方策と言える。従って、今後建造される船舶(特にコンテナ船)については、大型化を一層促進することが望ましい。

#### 減速航行

次に、運航面でのCO<sub>2</sub>削減方策の一つとして減速航行について検討した。

減速航行が輸送エネルギー効率を向上させることは、主機出力が船速の3乗に比例する船舶の特性からみても、また1970年代のオイルショック時期に多くの運航事業者が輸送エネルギー効率の改善対策として採用したことから明らかである。減速航行は新たな機器や大きな技術的ブレークスルーなしに対処可能な方策であり、仮にコンテナコンソーシアムや航路を限定した専用船航路でボラントリーに行えば、確実に効果を期待できるものと言える。

減速航行の効果に関する試算にあたっては、タンカー及びバルカーでは現在の運航速度を10%低下させる、コンテナ船では20%低下させるものと仮定した。表7.2-1の対策3に示すように、減速航行のCO<sub>2</sub>排出削減効果は大きく、第1評価基準である輸送エネルギー効率の向上でみた場合、ゼロオプションに対して27%前後の向上が見込まれる。またCO<sub>2</sub>排出量でみた場合、2020年の排出量は1997年に比して、upper caseでは約25%の増加、lower caseでは約1%の増加にとどまるものと考えられた。

将来の輸送量の伸びをどう見込むかにもよるが、前述した他の短期的方策を併せて実施することによって、計算上は第2評価基準(2020年におけるCO<sub>2</sub>排出総量の1997年比6%削減)にも到達可能な削減レベルが期待できる。

以上のように、減速航行では大きな CO<sub>2</sub> 削減効果が期待できるものの、その実現性には大いに疑問がある。経済の自由化に伴って一層活性化している現在の国際貿易状況において、製品輸送の割合が多いコンテナ輸送では逆に「高速化」に対するニーズが強く、無条件に減速航行を導入できない状況にある。

また、減速航行を行うことは、1 隻当たりの実質年間輸送距離を減らすことにつながるため、航路、船種などによっては輸送能力が需要を下回る可能性があり、この場合は船舶数を増やすことにつながる。

例えば、定期コンテナ航路においては、各港への寄港曜日が固定できるように配船スケジュールが組まれており、航路全体に就航する隻数は平均速度に対して階段状に決定される。従って、減速航行の導入は隻数増加に繋がり、既存船が減速航行で稼いだ燃料消費量の削減分を追加された新造船が新たに使用し、思ったほど効果が上がらないという可能性もあろう。

さらに、誰が、どうやって、「上限速度が守られている」ことを監視するのか、実効性の担保についても問題がある。

この様に、減速航行による CO<sub>2</sub> 削減効果は大きいものの、その実施には問題も多く IMO 等の国際的機関の場において慎重に検討を続ける必要があると考える。

## 評価

減速航行及び船舶の大型化以外の短期的削減方策(高船齢船の早期代替、推進器に対する改良技術の導入、CO<sub>2</sub> 以外の温室効果ガスの排出削減)による輸送エネルギー効率の改善効果は 5~6%と考えられ、2020 年時点で第 1 評価基準(輸送エネルギー効率の 6%改善)がほぼ達成可能なレベルまで改善が期待できる。

一方、CO<sub>2</sub> 排出量では、将来の貨物量の伸びの結果、貨物量を低く見積もった lower case の場合でも、1997 年に比べて約 30%以上、排出量が増加すると予測され、第 2 評価基準の達成には全く不十分であると予測された。

短期的削減方策のうちでも削減効果の大きい推進器に対する改良技術の広範な普及は、日本国など造船先進国では実施例が多いことから、今後新造船に対しては広範な船型、船種に普及していくことが充分期待できると考えられる。しかし、世界全体での効果を期待するためには、既存船へのレトロフィットのスピードが重要である。

一般的に言って、輸送エネルギー効率の悪い高船齢船は、パナマ、リベリアなどの発展途上国に便宜置籍されている場合が多く、経済余命とのバランスから改造に伴うコストのかかる推進器の改良を進んで実施する可能性は低い。従って、レトロフィットを促進するためには、何らかの経済的な仕組みを別途設ける必要がある。このためには、COP で論議されている CDM(クリーン・デベロップメント・メカニズム)のように、推進器に対する改良技術などについて、途上国への技術協力によって生じた削減分を先進国の削減分にカウントするといった方策も検討に値する。なお、市場原理に基づく CDM や排出

権売買などの方策は、可能な限り早期に導入予定をアナウンスすること、あるいは議論を開始することにより、ボランタリーな前倒し効果が生じることがあり、これが短期的削減技術の導入の促進にもつながる可能性もあることから、IMO など国際的な場で積極的な議論が展開されることが望まれる。

減速航行については、社会経済的影響からみて実現には困難が伴うが、その削減効果は大きい。従って減速航行は、大幅かつ短期間での CO<sub>2</sub> 排出量削減が外航船舶に求められた際のオプションとして議論が進められる必要がある。減速航行を導入する場合、効果的かつ公平にこれを実施する方策を別途検討する必要があるが、一般的に言えば「燃料単価の上昇」が減速航行を促す方向に作用すると考えられる。このために取り得る具体的な方法としては、いわゆる「環境税」の考え方がある。環境税は付録 4 に示すように、すでに多くの国での実施実績があり、今後の CO<sub>2</sub> 排出量抑制施策として、さらに多くの国が導入を進める可能性がある。

外航船舶に環境税を適用する場合、バンカーオイルに一定の税率(税額)を掛け、販売実績に応じて各国から徴収する方法が考えられる。これによって、燃料単価の適切な引き上げが図られれば、燃料コストを低減するためにオペレータが減速航行を指向するインセンティブになる。また、荷主を輸送総量を節減するマインドへ誘導する効果もあり、輸送総量の伸びを抑制する効果もあろう。当然のことながら、集められた税はより一層の温室効果ガス削減技術の開発や、発展途上国への技術援助などに再投資される必要がある。

ただし、その導入には以下のような大きな問題があることに留意する必要がある；

- 1) そもそも保税扱いのバンカーオイルに税をかけることができるのか。
- 2) バンカーオイルに掛けられた税の徴収、再投資の役割を誰が担うのか。IMO にその権限があるのか。
- 3) 論理的に税の最終負担者は誰なのか。荷主なのか、船主なのか。その調整を誰が図るのか。そもそも、税導入に伴う輸送コストアップを価格転嫁できるのか。

これらの課題は、国際的に論議することが必要であることに加えて、外航海運に従事する業界側だけの論議では解決が図れないものである。また、税率(税額)をどの程度にするのかについては、世界経済に悪影響を及ぼさないことを前提に、最終価格に転嫁する、あるいは広く浅く夫々が負担するような率(額)を経済学的に分析する必要があると考えられる。その結果を踏まえて、荷主・消費者など広範なステークホルダーを交えた議論を今後行っていくことが適切である。

以上述べてきたように、減速航行を除く短期的削減方策だけでは、第 2 評価基準である温室効果ガス排出総量の削減には不十分(1997 年に比して CO<sub>2</sub> 排出量は 30 ~ 60% 増)であり、次に述べる中期、長期的検討課題にも取り組んでいくことが必要と考えられる。

## (2) 中期的削減方策

ここでは、概ね2010年以降において実施可能と考えられるものを「中期的削減方策」と捉えた。具体的には、燃料転換及びマイクロバブルなどによる粘性抵抗の低下技術の開発と北極海航路実現、そしてCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスであるN<sub>2</sub>O等の削減技術である。

### 輸送エネルギー効率改善技術の導入

#### (燃料転換とマイクロバブル技術の実用化)

燃料転換とマイクロバブル技術の実用化を輸送エネルギー効率の改善のための中期的な技術として取り上げた。

メタノール、DME、LNG 及び水素を使ったガスエンジンまたはディーゼルエンジンは陸上では既に実用化され、実績も充分ある。要素技術としてのパイロット噴射などは既に開発済みであり、大型船用機関に転用する場合でも、技術的には大きな問題は生じないであろう。問題は燃料コストである。質量当たりの燃費として考えた場合、メタノールでほぼ同等、水素、メタンで 5-10%程度劣る。同出力当たりの CO<sub>2</sub> 排出量で比較した場合、水素で 100%、メタンで 18%、メタノールで 12%の削減に繋がる。

また、マイクロバブルは現在水槽実験が行われている程度であるが、粘性抵抗を大幅に減少することができ、これも 10～20%程度の燃料削減に繋がる要素技術であると評価できると考えられた。

これらの新規技術の導入による CO<sub>2</sub> の削減効果を-15%と仮定すると、CO<sub>2</sub> 排出量は、ゼロオプションに比較して-6%程度、前述した減速航行以外の短期的方策と組合せれば-11～12%の削減効果がある。しかしながら、短期的方策と組合せても、2020年のCO<sub>2</sub> 排出量は、1997年に比して upper case で 60%弱、lower case でも約 25%増加すると予想された(表 7.2-1 対策 4 参照)。

マイクロバブル技術の開発のためには、高効率の送風機などの要素技術の開発が必要であり、代替燃料の普及のためには、燃料コストの大幅な削減と社会インフラの整備が必要である。もちろん容易なことではないが、上記のように温室効果ガス対策としてはかなり大きな効果を持つと考えられるため、早期の開発・実用化が望まれる。

### 北極海航路の実現

欧州と極東をほぼ最短距離で結ぶ北極海航路では、現在のスエズやケープタウン経由の航路と比較して航行距離が半分近くまで大幅に減少する。東京湾～スエズ～ハンブルグの輸送距離は約 11,400 マイル、北極海航路を通った場合は約 6,600 マイルであり、輸送距離がおおよそ 40%削減される。両者の海象や平均運航速度の影響はあるが、大幅な時間短縮と燃料消費量の削減が期待できる。欧州と国際ハブ港が集中する極東域とを結ぶ新航路の開発には、今後のコンテナによる製品及び冷蔵食品輸送の増加など、両経済域へのプラスの経済的波及効果も大きく期待されている。

現在はロシア国内の北極海航路航行に関する制度が十分整備されていないため、商業航路としては確立していない。今後は、ロシアが北極海航路を航行する船舶に対して気

象海象情報及び砕氷船の支援サービスを行い、スエズ運河のように通航料を徴収する形態にする、あるいは北極海航路利用により削減される排出量をロシアの排出権として売買するなどの施策を行うことが可能であれば、外貨の獲得にも繋がることから、同国の積極的な関与も期待できるのではないかと考えられる。

日本、ノルウェー、ロシアによる国際共同研究事業、「国際北極海航路計画(International Northern Sea Route Program : INSROP)」が、北極海航路に関する広範な知識ベースを構築することを目的として1993~99年まで実施され、シップ・アンド・オーシャン財団は重要な役割を果たした。広範なテーマに関する総計167編の各種論文が刊行された他、北極海航路運行シミュレーション研究、地理情報システムであるINSROP GISデータベースや北極海航路環境アトラス等の成果が生れ、一般の利用に供されている。

#### CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスの排出削減

船用ディーゼル機関からのN<sub>2</sub>Oの削減に関しては、抜本的な対策がないというのが現状であろう。これは、NO<sub>x</sub>に比して微量のN<sub>2</sub>Oを燃焼状態の制御対象とすることが困難であること、燃料中の窒素分の酸化によるN<sub>2</sub>Oの生成過程が十分に解明されていないことなどによる。陸上においても、今のところ、燃焼過程からのN<sub>2</sub>O排出については削減目標値が設定されていない現状にある。

一方、排ガス中のNO<sub>x</sub>を後処理する技術としてはアンモニア選択接触還元法(SCR法)が開発されており、一部の船舶にも搭載されている。また、脱硝率が高くかつSV値が高い場合、NO<sub>x</sub>だけでなくN<sub>2</sub>Oも還元分解される事が報告されている。しかし、SCR装置は還元剤や反応空間が必要であり、多くの船舶で利用するためには、小型化などの技術開発が必要である。現在の脱硝装置には還元剤としてアンモニアや尿素を使用するので、その格納場所が必要となり、危険物としてのハンドリングの煩雑さや機関室や荷室等スペースユーティリティ上も問題が生じる場合が多い。そこで、燃料油からエチレン、プロピレンなどの炭化水素を抽出し還元剤として利用する船用脱硝プラントについて、シップ・アンド・オーシャン財団の資金援助で研究が行われ、効果が確認されている。また、将来は自動車エンジンのように、排ガス中の未燃分とNO<sub>x</sub>を触媒反応させるディーゼル3元触媒の開発と船用への応用も必要となろう。

また、還元反応に適した温度で常に運転される陸上固定機関と異なり、船舶主機関は機関負荷の変動が大きく、特に機関始動時や部分負荷時など排ガス低温時の脱硝効率が悪いという欠点がある。このため、低温時にはマンガン-ジルコニウム複合酸化物(Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・2ZrO<sub>2</sub>)やバリウム-銅化合物(BaCuO)等の吸着剤にNO<sub>x</sub>を吸着させ、一定温度以上になってからNO<sub>x</sub>を分解するシステムの研究をシップ・アンド・オーシャン財団では実施している。これは主に出入港の多い内航船を対象とした小型システムの開発を目標に行っているものである。

ここで紹介した脱硝装置はNO<sub>x</sub>を対象としており、直接N<sub>2</sub>Oの分解を対象としたものではない。今後は地球温暖化の観点からNO<sub>x</sub>とともにN<sub>2</sub>Oの削減を目的とした技術

開発が必要になるであろう。

次に、冷蔵・冷凍コンテナなど、船用冷蔵冷凍機に使用される冷媒の転換について考える。短期的対策で述べたように、代替フロンはオゾン層破壊防止に対しては満足できる性能があるが、温室効果の面では高い環境負荷を有している。

特に、利用環境の厳しい冷蔵・冷凍コンテナにおいてメンテナンスなどにより漏洩量を極小にするには大きな労力が必要となることから、今後はさらに環境負荷の低い冷媒の開発が必要となる。現状では冷凍能力不足とされているものの、アンモニア及びブロパンやブタンといった炭化水素、そして二酸化炭素など、温室効果が比較的低い若しくは無い自然冷媒の使用により、代替フロンの使用を抑制する方策も考えられる。既に、アンモニアについては過去に船用冷蔵冷凍庫での使用実績があるが、弱燃性や毒性などの問題があることから、今後冷蔵・冷凍コンテナでの実用化に向けた技術開発が望まれる。

さらに、タンカーでは航行中の CH<sub>4</sub> の回収による排出削減も可能性がある。吸着自体は活性炭等で可能であるが、長時間に渡って吸着可能な基材の開発とカートリッジの小型化を中心にした実用化が課題になると考えられる。

## 評価

中期的削減方策では、削減効果の定量的な予測が困難なものが多いため、 の燃料転換とマイクロバブル技術の導入効果についてのみ定量的な効果を検討した。

表 7.2-1の対策 4 がその結果である。これによると、単独効果として、第 1 評価基準である輸送エネルギー効率には 3~4%の向上が期待される。一方、CO<sub>2</sub> 排出量については、ゼロオプションに対しては-6%という削減効果が予測されたが、2020 年の排出量は 1997 年に比して 30~70%の増加とり、第 2 評価基準のレベル到達には不十分であった。また、減速航行を除く短期的方策と組み合わせた場合であっても、2020 年の CO<sub>2</sub> 排出量は 1997 年に比して 25~60%増加すると予測された。従って、短期及び中期的な削減技術だけでは第 2 評価基準の達成には不十分であると予測され、以下に述べるような長期的対策を推進していくことが必要であるものと考えられた。

### (3) 長期的検討課題

これまで述べたように、外航船舶の輸送総量は世界の経済成長に伴って大幅な増加が予想されているため、温室効果ガスの増加に今後20年間で実質的に歯止めをかけることは非常に困難な状況である。むしろ、長期的な視野に立って、世界経済の成長と歩調を合わせた方策の検討が必要と思われる。

以下に現状で考えられるいくつかの方策について述べる。

#### 輸送エネルギー効率改善技術の導入(エンジンコンセプトの変更)

従来燃料コスト低減のため、低質燃料を用い熱効率を高めてきた船用ディーゼル機関は、今後長期的には環境負荷の低減のために、クリーン燃料及び自然エネルギーへの多角的対応など大きなコンセプト変更を検討する必要がある。

シップ・アンド・オーシャン財団を始め関連団体では、地球環境問題への取り組みの一環として様々な長期的技術開発に取り組んできた。ここでは、削減効果が大きく、将来有望と考えられるエンジンコンセプト変更の技術を3点紹介する。

#### 天然ガス改質船用セラミックスエンジン

天然ガス改質船用エンジンは、シップ・アンド・オーシャン財団で研究開発中の技術である。

このエンジンは、天然ガスを燃料とするが、排気ガス中の二酸化炭素から触媒及び排気熱によって、発熱量の高い水素と一酸化炭素に改質した上で、ガスエンジンに供給するものである。このガスエンジンにはセラミックスを用いた遮蔽効果の高い構造を採用することで冷却系を必要とせず従来より高温燃焼を可能とし、その高温の排気エネルギーを回収するものである。開発目標はプラント全体の熱効率70%以上、軸出力当たりのCO<sub>2</sub>排出量は、通常ディーゼルエンジンの1/2程度、同じくNO<sub>x</sub>排出量は通常ディーゼルエンジンの1/3~1/4を目指している。

#### 外航帆走商船の開発

1970年半ばに近代的帆走による補助推進が検討され、35,000DWTのバルカーに対して設置されたこともあり、一時期実用化に向けて開発が進められていた。

財団法人日本船用機器開発協会では、平成2年に近代帆走装置による風力利用、船体風圧抵抗の減少などを他の省エネ技術を組み合わせた超省エネ船の概念設計を行い、設計上は貨物船で約41%、バルクキャリアで約34%の輸送エネルギー効率の向上が得られると予測された。その他デンマークにおいても1995年以降大型外航商船への適用を目的に開発が進められており、同様に25~50%の燃料削減効果が得られるとしている。

荒天時の安全対策や軽量帆材の実用化などを含めて実用化には課題が多いが、気象海象予測の進歩に併せた帆走補助航法の開発や上部構造物が大きな船舶の揺動の研究も含めた今後のさらなる開発が必要であろう。

### 燃料電池推進船

燃料電池は原理的に熱効率が低いこと、可動部分がないため静粛性、取り扱い性に優れていること、排気ガスがクリーンで NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> ともゼロエミッションであること、電池本体の船舶内での配置上の自由度が高く従来のような大型の機関室を船尾部に設置する必要がなくなる為、船尾形状の設計の自由度が大幅に上がるといった特徴がある。陸上の小規模発電用にはリン酸型燃料電池が一部で使用されているほか、電気自動車用として固体高分子型燃料電池の開発が目覚しく、数年後には実用化される勢いである。この種の燃料電池は、比較的セル容量が小規模なため自動車、一般家庭及び小規模事業所のエネルギー源等には適用できるものの、大出力が必要な外航船舶への応用は困難と考えられている。

シップ・アンド・オーシャン財団では、1990～1991年に燃料電池推進船についての調査研究を実施した。この研究では、発電効率が大きく大出力が得られる熔融炭酸塩型燃料電池を船用推進機関として利用する上での技術的課題の抽出や、燃料電池推進船に関する試設計などを行った。その結果、もともとボイルオフガスの発生があり改質器への燃料供給が容易な LNG 船、機関室の高さ制限が厳しい大型フェリー(導入により車室の設計自由度があがる)、そして低振動や静粛性が求められる海洋観測船等に対する適用にはメリットがあるものの、他の船種に対してはメリットが乏しいとされた。今後は改質器の性能向上やセル当たり出力の向上などの技術開発が重要であると考えられる。

### モーダルシフトの促進

先にも述べたように、船舶輸送は元来大量輸送機関としての優秀性がある。

1998年の日本国内における輸送トンキロ当たりの CO<sub>2</sub> 排出量を表 7.2-3に示した。内航海運の輸送エネルギー効率は鉄道にはやや劣るものの、営業用トラック輸送に比べれば約 1/5、航空貨物輸送に比べれば約 1/40 である。なお、外航海運は航空機貨物輸送及び陸上貨物輸送に比べて圧倒的に輸送エネルギー効率が低い(鉄道輸送の約 1/2、営業用トラック輸送の約 1/20、内貿航空貨物の約 1/170)。

国際貿易のモーダルシフトについては、各国、各地域の状況によって取り得る方策が違ってくる。例えばわが国は、国際貿易で想定できるモーダルシフトは外航海運と航空機輸送に限定される。一方、欧州地域の場合には、河川を含む船舶輸送、自動車輸送、鉄道輸送の間でのモーダルシフトも考えられる。

ここでは、国際航空貨物と外航船舶のモーダルシフトについて単純な試算を行ってみる。1997年の国際航空貨物輸送量は約  $100 \times 10^9$  トンキロである(平成 10 年版 運輸白書)。これに表 7.2-3に示した航空貨物の輸送エネルギー効率を用いて CO<sub>2</sub> 排出量を計算してみると、1997年の国際貨物輸送による CO<sub>2</sub> 排出量は約  $154 \times 10^6$  t-CO<sub>2</sub> となる。表 7.2-3の輸送エネルギー効率の比率からすれば、同じ量の貨物輸送を内航海運で行った場合(高速性や発着の頻度を考慮すると外航海運並の効率は期待できない)は約  $4 \times 10^6$  t-CO<sub>2</sub> の排出である。1997年の外航船舶からの CO<sub>2</sub> 排出量(約  $370 \times 10^6$  t-CO<sub>2</sub>; 表 7.1-2参照)を考慮す

ると、航空+外航船のCO<sub>2</sub>排出量は貨物量の10%のモーダルシフトによって、(154+370=524) (154×9/10+370+4×1/10=509)となり、約3%の削減が可能であることになる。

もちろん、このような単純な試算で結論は出せないが、自動車輸送や航空輸送による貨物輸送を船舶に移行するモーダルシフトは、確実に温室効果ガスの削減に繋がる方策である。

モーダルシフトの実現に向けては多数の困難がある。航空貨物で運んでいる荷物は、高い運賃を負担しても高速で運ぶことに意義があるものであり、これを簡単に船舶輸送で置き換えることはできないだろう。また、エンドユーザー(戸口)への配送にはトラック輸送が必要であり、長距離輸送を船舶に置き換えても、港湾からの輸送距離やトランジットの時間やエネルギーを考慮すると、思ったほどの効果が上がらない場合もある。しかしながら、地球温暖化防止の観点からは、船舶だけでなく広く輸送システム全体の効率化、最適化の観点にたった長期的視点での検討が必要である。

表 7.2-3 各交通機関における貨物輸送トンキロ当たりのCO<sub>2</sub>排出量(1998年)

単位:t-CO<sub>2</sub>/10<sup>6</sup> トンキロ

自家用トラック貨物	913
営業用トラック貨物	198
鉄道貨物	22
国内航空貨物	1,539
内航海運	39

交通関係エネルギー要覧(2000),国土交通省総合政策局編より作成。  
内航海運にはフェリーによる輸送量は含まれない

## 評価

(2)で述べたように、短期的方策と中期的方策を組み合わせたCO<sub>2</sub>排出量削減対策では、2020年の排出量は1997年に比べて25~60%増加すると予測されている。従って、減速航行というオプションを使わずに第2評価基準を達成するためには、長期的対策として30%あるいは50%といった水準で輸送エネルギー効率を改善できる技術を開発・導入し、しかも長期的方策を導入した船舶が全体の相当な割合を占めるように誘導しなければならない。で示したように、エンジンコンセプトの大掛かりな変更を伴う輸送エネルギー効率の向上策については、単体としての輸送エネルギー効率の改善効果は極めて大きく、その開発・実用化を大いに促進する必要がある。

また、モーダルシフトの促進は長期的観点に立てば、運輸部門全体での温室効果ガスの削減になり、大変有効な方策である。しかしながら、モーダルシフトの概念やその意義は十分に理解されているものの、国際航空輸送、国際トラック輸送、外航海運輸送を総合した、かつ現実味を帯びた検討は不十分である。このためには、IMOにおいて外航海運のみを対象とした論議だけでは先へ進むことはできない。より大きな枠組み(例えばCOP;気候変動枠組条約締結国会議)の中で、国際輸送部門全体での対応策という視点から外航海運の位置づけと役割を明確にし、輸送部門全体での削減を目指すことが本来の意味での地球温暖化防止への貢献につながることを共通の理解とするよう努力を続ける必要がある。

### 7.3 結語

人類が社会経済活動を営んでいくうえで、物資の安定的な輸送を確保していくことは、過去においても将来においても最も基本的な条件のひとつである。発展途上国において今後見込まれる経済成長や進展著しい世界経済のグローバル化は、今後さらなる国際貿易の拡大とこれに伴う貨物輸送量の増大をもたらす、これを支える輸送サービスに求められるニーズも益々多様化していくものと考えられる。外航海運は、一度に大量の貨物を運ぶことができ、かつ、輸送コストの面から見ても、輸送エネルギー効率の面から見ても極めて優れた輸送機関であり、今後も国際貿易においてその中心的な役割を果たし続けることは間違いない。

輸送活動に伴う温室効果ガスの排出は、基本的にはそれぞれの輸送機関の輸送エネルギー効率と輸送する貨物の輸送総量に依存する。

低コストの大量輸送機関である外航海運については、前者の輸送エネルギー効率～すなわち単位輸送量あたりの燃料消費量～の改善はいわば永遠の課題であり、1970年代の石油危機を中心に格段の改善が図られてきた。将来にわたっても、本章にまとめたとおり、既存の技術を広範に適用することにより5%程度の改善は十分可能であり、これとCO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスに対する対策をあわせて講じることによって、本調査において第一評価基準として掲げた単位輸送量当たりの温室効果ガスを6%削減するという目標は概ねクリアできるものと考えられる。さらに中長期的には、LNGや水素等の代替燃料を用いた機関やマイクロバブル等による抵抗低減技術の導入によりさらに15%程度の改善が可能であり、外航帆走商船、天然ガス改質船用セラミックエンジン、燃料電池推進船等といった画期的な技術の開発研究も既に着手されている。このような技術を個々の船舶に適用し、実際に温室効果ガスの排出削減を図っていくことは、国際海事機関(IMO)を中心とした現在の国際的なスキームにより実現可能であり、今後その方向で国際的なコンセンサスを形成していく必要がある。わが国は、従来からのIMOにおける主導的な役割と、先進造船国としての技術開発でのリードの両面で、国際的に大きな貢献を果たすことができるものとする。

一方、外航船舶で輸送される貨物総量の将来見通しについては、その具体的な伸び率についてはその見方に多少の幅はあるものの、世界の経済成長とともに全体としては着実に増加していくことは確実である。その結果として、前述したようなさまざまな技術を個々の船舶に導入したとしても、これによる輸送エネルギー効率の改善効果は外航船舶全体としての貨物総量の伸びに相殺されてしまい、温室効果ガスの総量としては逆に増大してしまうことになる。これを解決し、本調査において第二評価基準として掲げた温室効果ガスの排出総量の6%削減を達成するためには、減速航行といったような大胆な手を打つ必要がある。しかしながら、減速航行は輸送サービスの明らかな低下をもたらす、ひいては生産・流通システムの見直しやライフスタイルの変更を強いることになり、さらには経済成長の減速をもたらすおそれすらあるわけであるから、減速航行を実施に移すためにはこれを受認する社会的なコンセンサスの形成が不可欠である。また、これを実施に移すためには、他の輸送機関を含めた環境税の導入等、減速航行に対してインセンティブを付与する実効性のある制度の整備が必要である。

このように、外航船舶の運航に伴う温室効果ガスの排出総量を削減する事には極めて大きな

困難が伴うが、われわれは健全な地球環境を保全し、持続的な発展を維持していくために、その目標に少しでも近づけるよう最大限の努力を払う義務があるものとする。そのためにはまず、既存の削減技術の導入や輸送エネルギー効率の悪い老齢船の代替等、すぐにでも実行に移すことができる対策について、IMOにおける国際的な枠組みの制定に向けて早急に取り組むとともに、将来のさらなる削減に必要な先進的な技術開発を促進するために、環境税等を財源とした研究開発プロジェクトへの支援やクリーン開発メカニズム(CDM)の制度化によるインセンティブの付与等、必要な環境整備に取り組む一方、モーダルシフトによる輸送機関全体での排出総量削減を図るために、グリーン調達税制や環境会計の導入等により、荷主側がモーダルシフトを進めやすいような環境条件を整備する必要があるものとする。

# . 付 録



## 1 船種ごとの燃料消費率の推定

燃料消費率を推定する際に、年間航行距離、年間輸送総量、航海日数等が把握可能であれば推定も容易になるが、全船舶を対象にこれらの情報を入手することは困難である。

そこで、船種ごとの燃料消費率(t-Fuel/隻・日)については、1986年及び1991年、1996年、1999年の日本船舶明細書(以下、船舶明細書)に記載されている1日あたり燃料消費量を基礎データとして推定することとした。

調査の内容 1.1で示したように、本研究では船種・船型・船齢別の燃料消費率と、これに相応する稼働量(年間輸送総量または年間航海日数)を求め、その積として年間燃料消費量(t-Fuel/年)を算出し、CO<sub>2</sub>排出量に換算する。基本となる船舶明細書記載の燃料消費率の単位はt-Fuel/隻・日であるので、ここでもそれを基本とし、船種・船齢別に航海1日あたりの燃料消費率とDWTの関係を求めることとした。

ここで用いる船舶明細書記載の1日あたり燃料消費量データは、新造時(試験航海時)の最大航海速度時のものであり、船毎に航海速度が異なる。航海速度と燃料消費率の関係については式1に見られる関係(勝原, 1996)<sup>26</sup>が一般に用いられる。そこでこの式を用いて、船種・船齢毎に同一の速度で航行した場合の燃料消費率を船舶明細書データから求め、この値とその船のDWTをプロットすることにより、両者の関係式を得ることとした。

$$\frac{FUEL}{FUEL_0} = \left( \frac{SPD}{SPD_0} \right)^\beta \dots \dots \dots \text{式1}$$

ここで

- FUEL :航海速度時の燃料消費量(t-Fuel/日)
- FUEL<sub>0</sub> :船舶明細書記載の燃料消費量(t-Fuel/日)
- SPD :航海速度(knt)
- SPD<sub>0</sub> :船舶明細書記載の満載航海速力(knt)
- :定数(船種により異なる)

なお、式1における  $\beta$  の数値は理論値としては3とされているが、勝原(1996)<sup>26</sup>は実測値としての値を求めている。船種別の燃料消費率の推定方法は以下のとおりである。

### 1.1 タンカー

1986年、1991年、1996年及び1999年の船舶明細書からは、合計215隻につき燃料消費率データが得られた。船齢別、船型別のサンプル数は表 1.1-1に示すとおりである。

船舶明細書には蒸気タービンを主機とするものが130隻含まれていた。タービン主機船は主として1970年～1980年建造の10万～14万トンクラスに多く記載されていたが、おそらくその後、ディーゼル主機への換装が行われていると考えられる。しかし、これらの古いタンカーは既に解撤あるいは売却されており、我が国では登録されていないため、主機換装などの変更内容及び実施時期は把握困難であった。タービン主機とディーゼル主機では燃料消費率が全く異なるため、正しくは世界でのそれぞれの存在比率を把握しておくことが望ましい。ここでは、燃費

<sup>26</sup> 勝原光治郎 (1996) 「国内海上輸送におけるエネルギーの消費量」, 船舶技術研究所研究発表会(平成8年度秋季第68回), p286 291

の悪いタービン主機船は存在していても極く僅かであり、結果に大きな誤差はもたらさないと仮定し、以降はディーゼル主機船についてのみ考えることとした。

そこで、船舶明細書からタービン主機のデータを除き、満載航海速力と1日あたり燃料消費量が明記されているもの(表 1.1-1の215隻)について、満載航海速力を揃えて式1により燃料消費率を算出し、DWTとの関係をプロットした(図 1.1-1)。航海速度は、調査の内容1.2で各カテゴリについて設定した速度とした。タンカーのカテゴリ別航海速度の経年劣化は専門家等からの聞き取りにより5%/10年とした。

図1によれば、船齢あるいは一部の船型を適切に区分すれば、燃料消費率とDWTの関係は比較的明瞭な直線関係であることが認められた。そこで、基本的には船齢区分ごとに、1977年以前建造のタンカーについては更に12万DWTで区分して燃料消費率とDWTの関係式を求めた(図 1.1-1の下段を参照)。

これらの式に、各船齢・船型カテゴリの平均DWT(表 1.1-2)を代入し、それぞれの各カテゴリにおける平均的な燃料消費率(t-Fuel/隻・日)を求めた(表 1.1-3)。すなわちこれは、調査の内容中表 1.3-5で示した各カテゴリの平均航海速度に対応する燃料消費率である。なお、船舶明細書で燃料消費率が把握できなかった32万DWT以上のULCC船については20万～32万のDWTクラスの関係式を外挿した。

以上の過程により算出したタンカーのカテゴリ別の平均的な燃料消費率の推定値(t-Fuel/隻・日)は表 1.1-3に示すとおりである。

表 1.1-1 燃料消費率の算定に用いたタンカーのサンプル数

単位:隻

DWT(10 <sup>3</sup> トン)	-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10 -25	6	4	-	-	0	10
25 -50	14	8	4	1	1	28
50 -80	14	26	3	2	1	46
80 -120	22	32	2	2	2	60
120 -200	22	3	-	-	-	25
200 -320	14	1	17	14	-	46
320 +	-	-	-	-	-	-
TOTAL	92	74	26	19	4	215

「-」は船舶明細書よりデータが得られなかったことを示す。

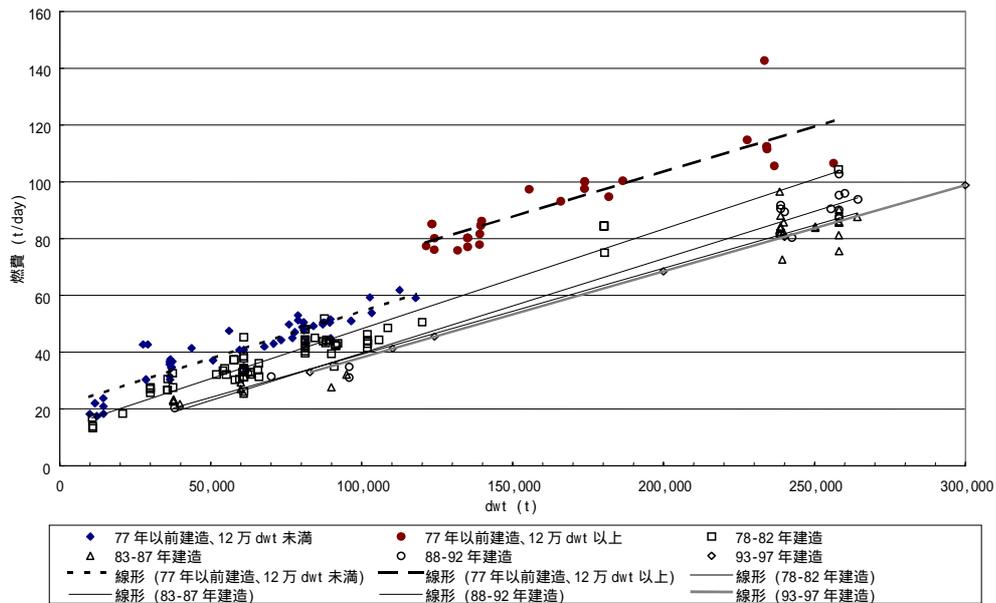
表 1.1-2 タンカーの各船齢・船型カテゴリの平均載荷可能量

単位:トン/隻

DWT(10 <sup>3</sup> トン)	-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98
10 -25	18,181	17,921	17,709	15,179	15,625
25 -50	34,723	37,585	39,569	40,994	43,313
50 -80	66,835	64,446	67,780	71,719	74,375
80 -120	95,540	93,105	94,588	99,449	100,176
120 -200	131,436	141,667	128,174	135,408	136,781
200 -320	254,861	251,852	232,738	258,260	275,030
320 +	371,619	377,778	-	-	-

Fearnleys (1999)、World Bulk Fleet January 1999より作成。

「-」はその船齢・船型カテゴリの船が存在しないことを示す。



区分		近似式
77年以前建造	12万DWT未満	$Y=3.36 \times 10^{-4}X+20.8$
	12万DWT以上	$Y=3.18 \times 10^{-4}X+40$
78-82年建造		$Y=3.51 \times 10^{-4}X+13$
83-87年建造		$Y=3.03 \times 10^{-4}X+9$
88-92年建造		$Y=3.33 \times 10^{-4}X+6.3$
93-97年建造		$Y=3.03 \times 10^{-4}X+7.9$

(Y:燃料消費率、X:各DWTクラスの平均DWT)

図 1.1-1 タンカーのDWTと燃料消費率の関係(新造時)

表 1.1-3 タンカーの平均的な燃料消費率の推定値

DWT(10 <sup>3</sup> トン)	-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	t-Fuel/隻・日
10	-25	19	17	16	13	12
25	-50	24	23	22	21	20
50	-80	34	32	31	31	29
80	-120	44	42	40	41	38
120	-200	70	64	55	56	52
200	-320	111	105	92	100	96
320	+	151	152	-	-	-

推定値は、船舶明細書記載DWT及び機関などの経年劣化を含んだ運航速度を代入した場合の平均的な燃料消費率。熱効率で、5%/10年で劣化すると仮定した。

「-」はその船型・船齢の船が存在しないことを示す。

## 1.2 バルカー

バルカーについては、鉄鉱石運搬船、石炭運搬船、その他のバルカーのそれぞれについて燃料消費率を設定する必要があり、タンカーと同じく、1986年、1991年、1996年及び1999年の船舶明細書に記載されている燃料消費率を基本データとして推定した。しかしながら、「その他のバルカー」については船舶明細書に記載されている燃料消費率データが少なく、これから求めた関係式には大きな誤差が生じるおそれがあると判断されたため、石炭運搬船の燃料消費率をもって「その他のバルカー」の燃料消費率に代えることとした。

### 1.2.1 鉄鉱石運搬船

1986年及び1991年、1996年、1999年の船舶明細書からは合計59隻につき燃料消費率データが得られた。船型・船齢別のサンプル数は表 1.2-1に示すとおりである。

タンカーと同じく、航海速度を揃えて式1により燃料消費率を算出し、DWTとの関係をプロットした(図 1.2-1)。航海速度は、。調査の内容1.3.2(2)で設定したように、カテゴリーに係わらず15kntとした。なお、鉄鉱石運搬船では推進効率の低下による燃料消費率の経年劣化を5%/10年としている。

図 1.2-1によれば、鉄鉱石運搬船の燃料消費率は20万DWT前後で明らかな不連続が見られた。この原因として、船舶明細書ならびに聞き取り等の調査結果によれば、1972年～1988年に建造された20万DWT超級の鉄鉱石運搬船では新造当時から搭載馬力数を低く設定しているため燃費的には極めて優れた船になっていることによると考えられた(注；その代わりに航海速度、巡航速度は余り大きくできない)。

以上の結果、鉄鉱石運搬船については、18万DWTで船型を区分して燃料消費率とDWTの関係を直線式として求め(図 1.2-1の下段に記載)、鉄鉱石運搬船のカテゴリー別平均DWT(

表 1.2-2)<sup>27</sup>から、カテゴリー別の平均的燃料消費率の推定値(t-Fuel/隻・日)を求めた(表 1.2-3)。また、32万DWT以上の船のデータは船舶明細書に存在しなかったため、20万～32万DWT区分の燃料消費率を代用した。

表 1.2-1 日当たり燃料消費量を算定した鉄鉱石運搬船のサンプル数

単位:隻

DWT(10 <sup>3</sup> トン)	-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	TOTAL
10 -25	-	2	-	-	-	2
25 -50	2	2	-	-	-	4
50 -80	7	-	-	-	-	7
80 -100	2	1	-	-	-	3
100 -120	3	6	1	-	-	10
120 -200	-	14	6	2	3	25
200 -320	-	2	-	-	6	8
320 +	-	-	-	-	-	-
TOTAL	14	27	7	2	9	59

「-」は船舶明細書よりデータが得られなかったことを示す。

表 1.2-2 バルカーの各船齢・船型カテゴリーの平均DWT

単位:DWT

DWT(10 <sup>3</sup> トン)	-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98
10 -25	18,301	19,600	20,130	19,048	19,880
25 -50	32,254	34,524	36,818	38,636	39,394
50 -80	62,679	64,455	64,935	68,217	70,347
80 -100	85,714	90,000	75,000	100,000	90,000
100 -120	116,667	111,111	100,000	-	100,000
120 -200	140,000	143,860	167,143	151,613	159,615
200 -320	300,000	216,667	225,000	218,750	220,000
320 +	-	-	400,000	320,000	320,000

Fearnleys, World Bulk Fleet January 1999より作成。

「-」はその船齢・船型カテゴリーの船が存在しないことを示す。

<sup>27</sup> 鉄鉱石輸送が専用船だけであれば、鉄鉱石運搬専用船のカテゴリー別平均載荷可能量を用いる必要があるが、鉄鉱石輸送は必ずしも専用船だけではないことから、ここではバルカー全体でのカテゴリー別平均載荷可能量を用いている。

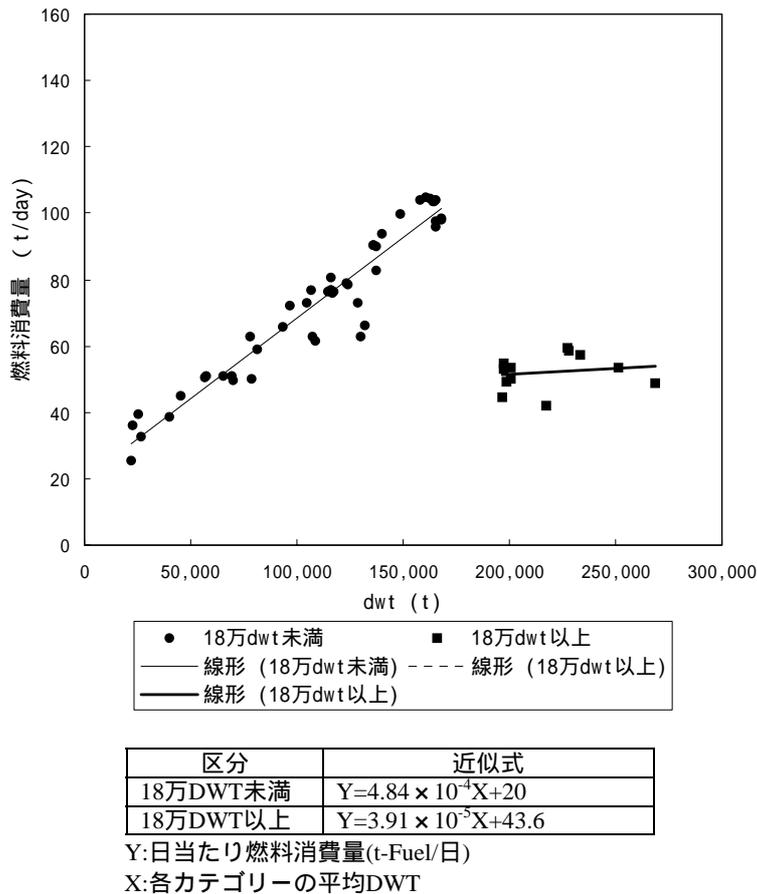


図 1.2-1 DWTと日当たり燃料消費量の関係(鉄鉱石運搬船)

表 1.2-3 鉄鉱石運搬船の日当たりの燃料消費量( $C_{jk}$ )

単位:t-Fuel/隻・日

DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979-83	1984-88	1989-93	1994-98	
10	-25	21.9	24.7	21.7	20.6	22.7
25	-50	32.2	28.0	20.9	19.8	21.8
50	-80	42.5	33.4	26.3	24.9	27.5
80	-100	49.8	43.5	30.5	28.9	31.9
100	-120	58.4	46.1	45.3	43.0	47.3
120	-200	88.9	77.4	58.0	-	55.0
200	-320	80	70.2	50.4	50.4	50.4
320	+	-	-	50.4	50.4	50.4

「-」はその船型・船齢カテゴリーの船が存在しないことを示す。

### 1.2.2 石炭運搬船ならびにその他のバルカー

前述のように「その他のバルカー」については多くの燃料消費率データが得られなかったため、ここでは石炭運搬船のデータを解析し両者に適用することとした。

石炭運搬船については、1986年及び1991年、1996年、1999年の船舶明細書からは合計24隻につき燃料消費率データが得られた。船型・船齢別の試料数は表 1.2-4に示すとおりである。

鉄鉱石運搬船と同じく、航海速度を揃えて式1により燃料消費率を算出し、DWTとの関係をプロットした(図 1.2-2)。航海速度は、調査の内容2.1章で設定したように、カテゴリー係わらず15kntとした。なお、推進効率の低下による燃料消費率の経年劣化を5%/10年として

いる。

図 1.2-2によれば、石炭運搬船の燃料消費率はタンカーや鉄鉱石運搬船と異なり船齢や船型での明瞭な差は認められなかった。サンプル数が少ないため、今後さらにデータが得られた場合には、船齢や船型で違いが生じる可能性はあるが、今回の調査においては船齢や船型を考慮せずに全体としての燃料消費率とDWTの関係を直線式として求め(図 1.2-2の下部に記載)、石炭運搬船のカテゴリー別平均載荷可能量(

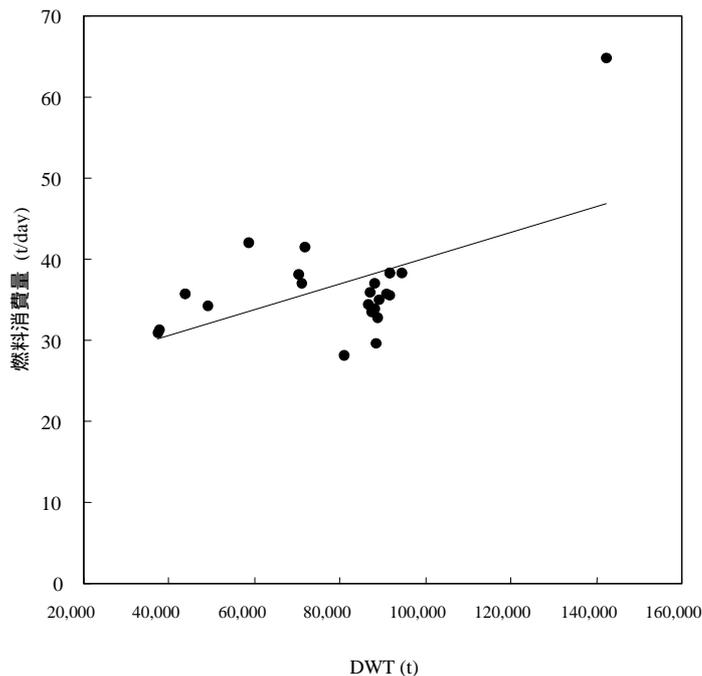
表 1.2-2)<sup>28</sup>からカテゴリー別の平均的燃料消費率推定値(t-Fuel/隻・日)を求めた(表 1.2-5)。

表 1.2-4 日当たり燃料消費量算定した石炭運搬船のサンプル数

単位:隻

DWT(10 <sup>3</sup> トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98	TOTAL
10 -25	-	-	-	-	-	-
25 -50	4	1	-	-	-	5
50 -80	2	2	-	-	-	4
80 -100	-	-	3	3	8	14
100 -120	-	-	-	-	-	-
120 -200	-	-	-	1	-	1
200 -320	-	-	-	-	-	-
320 +	-	-	-	-	-	-
TOTAL	6	3	3	4	8	24

「-」は船舶明細書記載データが得られなかったことを示す。



近似式

$$Y = 1.59 \times 10^{-4} X + 24.19$$

Y:日当たり燃料消費量(t-Fuel/日)

X:各カテゴリーの平均DWT

図 1.2-2 DWTと日当たり燃料消費量の関係(石炭運搬船)

<sup>28</sup> 鉄鉱石運搬船の脚注に同じ。

表 1.2-5 石炭運搬船・その他のバルカーの日当たりの燃料消費量( $C_{jk}$ )

単位:t-Fuel/隻・日

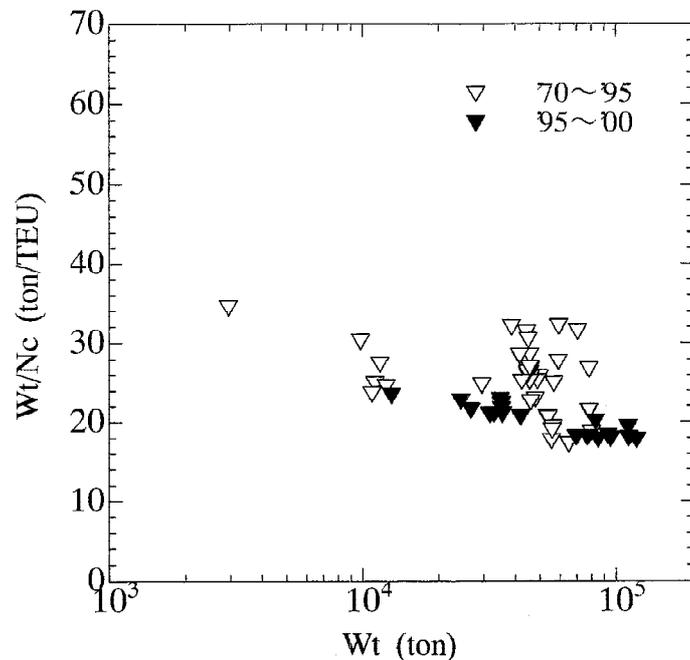
DWT( $10^3$ トン)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
10	-25	23	24	17	20
25	-50	32	27	21	21
50	-80	41	36	26	25
80	-100	50	35	32	34
100	-120	56	47	46	41
120	-200	72	62	50	54
200	-320	-	-	-	-
320	+	-	-	-	-

「-」はその船型・船齢カテゴリーが計算対象外であることを示す。

### 1.3 コンテナ船

表 1.3-1に示したように、1986年及び1991年、1996年、1999年の船舶明細書から得られたコンテナ船のデータは新しい船のデータが少なく、他の船種のように船型(コンテナ船ではTEU)と燃費の関係を全ての船型・船齢カテゴリーで求めるのは困難であった。各船齢区分でTEUと燃料消費率の近似直線を求めることができたのは、船齢区分が1978年以前のものだけである。

またコンテナ船の燃料消費量は他の船種のように、DWTで整理せず、載荷可能量TEUをパラメータとした。DWTと載荷可能量TEUの関係は、図 1.3-1に示すとおり載荷可能量(TEU)をDWTで除した値は、DWT(船型)が大きくなるにつれて減少する傾向がみられる。また、建造年代が新しくなると大きく減少する傾向にある。燃料消費量の評価やモデル化に際しても直接載荷可能量(TEU)をパラメータとすることで、これらの効果が盛り込めると考えた。



西川委員私信

図 1.3-1 コンテナ船のDWTと載荷可能量(TEU)の関係

燃料消費率の年代的な推移を知るため、コンテナ船についても他の船種と同じく、航海速度を揃えて式1により燃料消費率を算定した。航海速度は、調査の内容1.3.3で設定したように、船型・船齢カテゴリーに係わらず21kntとした。燃料消費量の経年劣化についても、他の船種と同様に5%/10年と設定した。次に、1日あたりTEUあたりの燃料消費率を求め、建造年代の関係をプロットした(図 1.3-2)。これによると、全建造年代を通して十分なデータが揃っている船型区分は2,000~4,500TEUの区分である。この船型区分で見ると、1970年代から1990年代にかけて1日あたりTEUあたりの燃料消費率は20~30%程度減少している。

そこで、データが十分にある1978年以前建造の船舶についてTEUと燃料消費率の関係を求め、これを基本として経年的に燃料消費率が改善される効果を盛り込むことにした。すなわち、図 1.3-3に示すように、1978年以前建造船について求めたTEUと燃料消費率の直線関係と上述の2,000~4,500TEUクラスにおける経年的な燃費改善(5%/10年と仮定)から、各船齢階級におけるTEUと燃料消費率の関係式を求めた(表 1.3-2)。ただし、ここで示した経年的燃費改善効果の仮定(年を追うごと直線的に燃費が改善される)では1994年~1998年建造船舶の燃費が極めて良くなりすぎることから、1989年以降は同一の関係式を用いることとした。表 1.3-2に示した関係式と表 1.3-3に示したコンテナ船のカテゴリー別平均載荷可能量(TEU)から船型・船齢別の燃料消費率を求めた。

表 1.3-1 日当たり燃料消費量を算定したコンテナ船のサンプル数

単位:隻

載荷可能量(TEU/隻)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
1000 未満	25	9	2	-	-
1000 以上 - 1999 以下	48	-	-	4	1
2000 以上 - 2999 以下	52	39	9	1	-
3000 以上 - 3999 以下	4		19	7	-
4000 以上 - 4499 以下	-	-	3	5	2
4500 以上	-	-	-	-	-

「-」はその船型の船舶明細書にデータが存在しないことを示す。

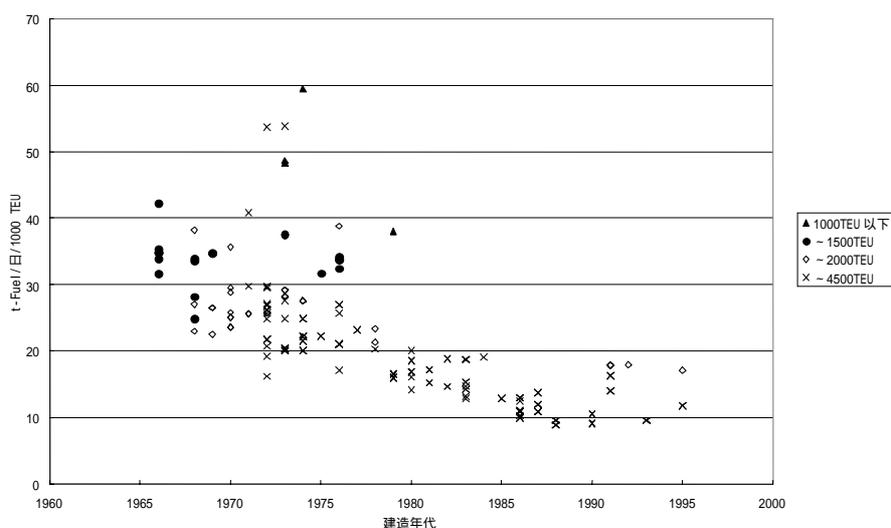


図 1.3-2 コンテナ船の建造年代にみるTEU当たりの燃料消費率

横軸は建造年代、縦軸は一定航行速度における1日あたりの燃料消費量(t/日/1,000TEU)を示す。

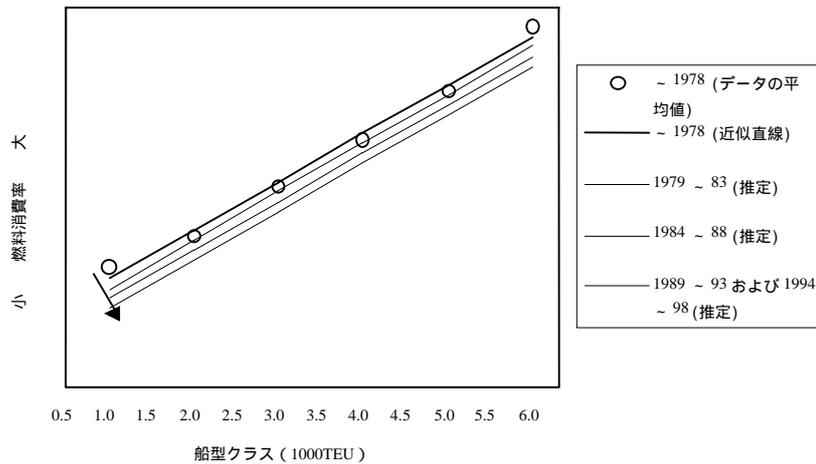


図 1.3-3 コンテナ船の船齢区分別燃料消費率の推定方法

1978年以前の船齢区分の燃料消費率のデータ(図中 )から近似直線(太実線)を求めた。他の船齢区分の燃料消費率の推定式は、1978年以前の船齢区分の傾きを参考にし、約5%/10年(図 1.3-2から推定)で燃料消費率が減少するように調整した(各破線)。

表 1.3-2 コンテナ船の日当たり燃料消費量を求める近似式

区分	近似式
- 1978	$Y=1.56 \times 10^{-2}X+70.4$
1979 - 83	$Y=1.52 \times 10^{-2}X+59.8$
1984 - 88	$Y=1.46 \times 10^{-2}X+57.1$
1989 - 93	$Y=1.45 \times 10^{-2}X+37.6$
1994 - 98	$Y=1.45 \times 10^{-2}X+37.6$

Y:燃料消費率(t-Fuel/日)

X:各カテゴリーの平均TEU

表 1.3-3 コンテナ船の平均載荷可能量

単位:TEU/隻

載荷可能量(TEU/隻)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
1000 未満	432	445	401	414	402
1000 以上 - 1999 以下	1,276	1,273	1,376	1,443	1,585
2000 以上 - 2999 以下	2,046	2,022	2,286	2,535	2,503
3000 以上 - 3999 以下	3,373	3,307	3,253	3,383	3,436
4000 以上 - 4499 以下	-	-	4,128	4,204	4,229
4500 以上	-	-	5,694	5,693	5,881

「-」はその船型のコンテナ船が存在しないことを示す。

表 1.3-4 コンテナ船の日当たりの燃料消費量( $C_{jk}$ )

単位:t-Fuel/隻・日

載荷可能量(TEU/隻)	-1978	1979 -83	1984 -88	1989 -93	1994 -98
1000 未満	60	55	53	40	40
1000 以上 - 1999 以下	60	55	53	40	40
2000 以上 - 2999 以下	74	68	66	53	54
3000 以上 - 3999 以下	87	81	79	66	67
4000 以上 - 4499 以下	101	94	91	79	81
4500 以上	-	-	104	92	94

「-」はその船型のコンテナ船が存在しないことを示す。

#### 1.4 設定した日当たり燃料消費量の妥当性検証

付録1.1から1.3に示した過程により、船種・船齢・船型別の燃料消費率を、船舶明細書に記載されている1日あたり燃料消費率データ及び航海速力から設定した。本調査で設定した燃料消費率は、船種別あるいは全外航船舶の燃料消費量の計算結果を強く支配する(計算モデル上、燃料消費率が2倍になれば燃料消費量は2倍になる)。この結果、当然のことながらCO<sub>2</sub>排出量に対しても大きな影響を及ぼす。そこで、今回設定した燃料消費率の妥当性を検討するため、元データである船舶明細書記載の1日あたり燃料消費率の検証を行った。

船舶の燃料消費率については、船の大きさや船速などから理論的に求めることが可能である。その理論式については、日本造船研究協会(1998)<sup>29</sup>がまとめており、これによれば輸送量(トン・km)あたりのエネルギー消費量  $\varepsilon$  (kcal/トン・km)は次のように表わされる。

基本的な の定義は次式のとおりである。

$$\varepsilon = \frac{\text{輸送に費やされるエネルギーの総量(kcal)}}{\text{有効な仕事量(ton・km)}}$$

について別の角度からみれば、次の式が成り立つ。

$$\varepsilon = H_0 \times SFC \times \varepsilon_H \quad (\text{式 1})$$

$H_0$  :燃料発熱量(kcal/kg-Fuel)

$SFC$  :主機燃費(kg-Fuel/PSH)

$\varepsilon_H$  :機関出力から推進エネルギーへの転換効率

$$\varepsilon_H = DHP/\Delta \times V \quad (\text{式 2})$$

DHP :伝達馬力(PS)

$\Delta$  :排水重量トン(ton)

$V$  :船速(knt)

式2に示された  $\varepsilon_H$ 、 $\Delta$ 、DHPは船舶明細書等から入手作成可能な値である。また、 $H_0$ はバンカーオイルの値として既知である。なお、 $SFC$ については、同じく造船研究協会(1998)が製造年代による機関熱効率の推移を示しており、これより1970年から1985年まで150g/PShから120g/PShに減少、以降の年は120g/PShで一定と仮定した。

以上により、船舶明細書等からデータが得られた船舶については  $\varepsilon$  を算出することができる。その船の仕事量(トン・km/日)は載荷可能量と巡航速度から得ることができるので、これを  $\varepsilon$  に乗じれば理論上の1日あたりエネルギー量が算出され、 $H_0$ を用いて理論上の1日あたり燃料消費率に換算可能となる。この理論上の1日あたり燃料消費率と、船舶明細書に示された1日あたり燃料消費率を比較することにより、後者の妥当性を検討した。

図 1.4-1にタンカーの1日あたり燃料消費率に関する比較を示した。これによると、理論上の

<sup>29</sup> (社)日本造船研究協会(1998)、「船型改善に関する研究成果活用に関する調査(流力部門)調査報告書」

燃料消費率と船舶明細書記載の燃料消費率は比較的良好な相関関係を示しており、船舶明細書記載の1日あたり燃料消費率データを船種・船齢・船型別の燃料消費率を算出するための基礎データとして利用することには十分信頼性があると考えられた。

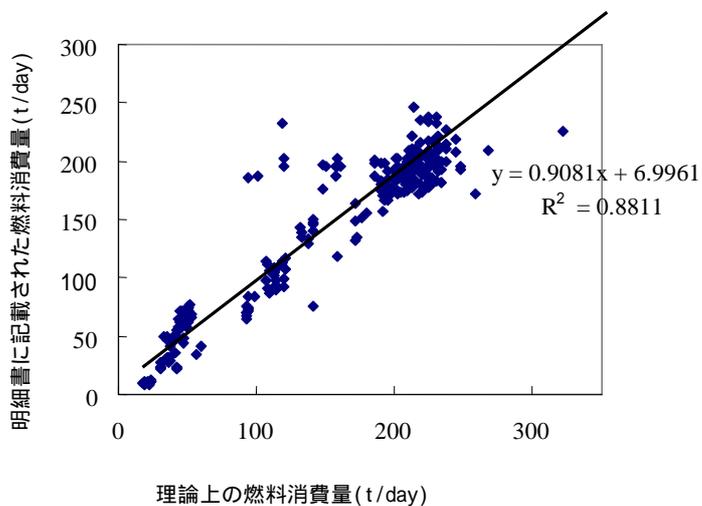


図 1.4-1 原油タンカーにおける理論上の日当たり燃料消費量と船舶明細書記載値の比較

## 2 輸送容量の予測

### 2.1 タンカー・バルカーの輸送容量の予測

まず、船種、船型、船齢に関わらず、船舶全体としての総輸送容量( $TC$ )、総建造需要量( $TD$ )、総必要船腹量( $TB$ )及び総解撤喪失量( $TL$ )の関係を整理してみる。ある西暦年( $m$ 年)の翌年における総輸送総量( $TC_{m+1}$ )は、その年の総輸送容量( $TC_m$ )、一年間で解撤あるいは事故で失われた全ての輸送容量( $TL_m$ )及び一年間に建造された全ての輸送容量( $TD_m$ )との収支であり、以下のように表される。

$$TC_{m+1} = TC_m - TL_m + TD_m$$

$TC_m$  :  $m$ 年における総輸送容量(DWT)

$TD_m$  :  $m$ 年における総建造需要量(DWT/年)

$TL_m$  : 総解撤喪失量。  $m$ 年において解撤及び事故により失われリプレースされる輸送容量( $TC$ )の総計(DWT/年)

$m$  : 西暦年

仮に、総建造需要量( $TD_m$ )を、積荷の増加など純粋に市場デマンドによって影響される新規船腹需要量( $TB_m$ )と、市場の動きとは独立してある年齢に達した老齢船が一定の割合で解撤されることにより生じる総解撤喪失量( $TL_m$ )との和として表現し、かつ総解撤喪失量( $TL_m$ )はその年のうちに全量リプレースされるとすると次式が導かれる。

$$TD_m = TB_m + TL_m$$

$TB_m$  : 新規船腹需要量。  $m$ 年において輸送量の増加に応じて新たに必要となる輸送容量( $TC$ )の総計 (DWT/年)

$TL_m$  :  $m$ 年における総解撤喪失量(DWT/年)

$TD_m$  :  $m$ 年における総建造需要量(DWT/年)

両式から、 $m$ 年の輸送容量( $TC_m$ )と $m+1$ 年の輸送容量( $TC_{m+1}$ )の差分は、以下のように新規船腹需要量( $TB_m$ )のみで整理されることになる。

$$\begin{aligned} TC_{m+1} &= TC_m - TL_m + TD_m \\ &= TC_m - TL_m + (TB_m + TL_m) \\ &= TC_m + TB_m \end{aligned}$$

これまで示した考えでは、老船齢船であって輸送に多く従事せず係留されている船についても、その年のうちに完全にリプレースされ輸送に従事することになる。また、実際には $TL_m$ は $m$ 年にすべて建造されるのではなく、 $m+2$ 年など、数年にわたって建造される場合もある。しかし、タンカー及びバルカーともに、35年船齢を超える船は輸送総量( $TC$ )全体に占める割合としては極めて少ないため、燃料消費量( $P$ )の予測計算上はほとんど影響が無いと考えた。

なお、現実には、総解撤喪失量の全てが同じ年にリプレースされるとは考えにくく、前年、翌年を含めて数年にわたってリプレースされることが予想されるが、今回の目的は各年における燃料消費量( $P$ )のばらつきではなく、長期的な変化をみることであるため、該当年に完全にリプレースされると仮定しても大きな誤差要因とはならないと考えた。

以上のように、輸送容量( $TC$ )の各年の伸び分は新規船腹需要量( $TB_m$ )で表現できることになるが、老船齢の解撤状況も船型 $j$ により異なる事が予想されるので、以下では総建造需要量( $TD_m$ )の要素である新規船腹需要量( $TB_m$ )及び総解撤喪失量( $TL_m$ )の推定方法及び予測結果について示した。

### 2.1.1 新規船腹需要量の予測結果

造船業基盤整備事業協会(2000)では、タンカーとバルカーの新規船舶需要量( $TB_m$ )は、それぞれの総貨物量( $TN_{im}$ )の年増加量に比例すると仮定しており、タンカーは原油及び石油製品、バルカーは鉄鉱石、石炭、穀物等のドライバルクの総貨物量( $TN_{im}$ )より船種ごとに予測されている。

各船型 $j$ への新規船腹需要量( $TB_{jm}$ )の割り振りは、輸送距離や大型化を考慮の上協会が独自の設定を行っている。造船業基盤整備事業協会(2000)によるタンカーの新規船腹需要量( $TB_{jm}$ )予測結果を表 2.1-1及び表 2.1-2に、バルカーの新規船腹需要量( $TB_{jm}$ )予測結果を表 2.1-3に示した。

2011年以降は、表 2.1-1、表 2.1-2及び表 2.1-3に示された2000～2010年の11年間の船型別新規船腹需要量( $TB_{ijm}$ )から船種船型別に年増加量(直線近似)を求め、これを適用することとした。タンカーとバルカーの新規船腹需要量( $TB_{ij}$ )予測結果を表 2.1-4に示した。

表 2.1-1 タンカーの船型別新規船腹需要量( $TB_{jm}$ )の予測結果(upper case)

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型 $j$ (10 <sup>3</sup> DWT)	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
10-25	0.008	0.009	0.005	0.004	0.012	0.014	0.012	0.011	0.024	0.029	0.027
25-50	0.279	0.307	0.184	0.138	0.438	0.489	0.435	0.395	0.855	1.037	0.981
50-80	0.334	0.359	0.193	0.153	0.547	0.647	0.560	0.461	0.952	1.189	1.192
80-120	0.487	0.512	0.243	0.206	0.829	1.029	0.871	0.656	1.286	1.660	1.760
120-200	0.443	0.801	0.908	0.519	0.970	0.653	0.390	0.481	1.083	1.133	1.007
200+	1.319	2.241	2.369	1.380	3.151	2.430	1.531	1.471	4.100	5.475	4.801
合計	2.869	4.229	3.902	2.398	5.946	5.263	3.798	3.476	8.300	10.523	9.768

造船業基盤整備事業協会(2000)「EU提案に基づきダブルハル化を実施した時の船腹需給量等に関する調査」より作成。

表 2.1-2 タンカーの船型別新規船腹需要量( $TB_{jm}$ )の予測結果(lower case)

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型 $j$ (10 <sup>3</sup> DWT)	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
10-25	0.008	0.006	0.004	0.005	0.006	0.007	0.009	0.009	0.008	0.008	0.008
25-50	0.279	0.208	0.135	0.165	0.211	0.267	0.328	0.326	0.296	0.283	0.288
50-80	0.334	0.244	0.142	0.183	0.264	0.353	0.423	0.381	0.329	0.324	0.350
80-120	0.487	0.347	0.178	0.247	0.400	0.562	0.658	0.542	0.444	0.453	0.517
120-200	0.443	0.544	0.667	0.620	0.468	0.356	0.294	0.397	0.374	0.309	0.296
200+	1.319	1.520	1.742	1.650	1.520	1.325	1.156	1.214	1.417	1.493	1.410
合計	2.869	2.869	2.869	2.869	2.869	2.869	2.869	2.869	2.869	2.869	2.869

造船業基盤整備事業協会(2000)「EU提案に基づきダブルハル化を実施した時の船腹需給量等に関する調査」より作成。

表 2.1-3 バルカーの船型別新規船腹需要量( $TB_{jm}$ )の予測結果

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型j (10 <sup>3</sup> DWT)	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
10-25	0.350	0.273	0.076	0.086	0.335	0.199	-0.020	0.211	0.573	0.441	0.246
25-50	1.252	0.974	0.272	0.307	1.198	0.711	-0.072	0.755	2.048	1.574	0.878
50-80	2.050	1.815	0.592	0.407	1.107	0.524	-0.035	0.520	2.158	2.057	1.299
80-100	0.099	0.095	0.027	0.013	0.048	0.029	-0.002	0.020	0.108	0.118	0.067
100-120	0.121	0.116	0.033	0.016	0.058	0.035	-0.002	0.024	0.132	0.144	0.082
120-200	0.177	0.169	0.048	0.024	0.085	0.051	-0.003	0.036	0.192	0.210	0.119
200+	1.722	1.651	0.464	0.232	0.827	0.498	-0.034	0.347	1.868	2.047	1.163
合計	5.771	5.093	1.511	1.086	3.659	2.046	-0.169	1.913	7.078	6.592	3.854

造船業基盤整備事業協会 (2000) 「EU提案に基づきダブルハル化を実施した時の船腹需給量等に関する調査」より作成。

船型カテゴリ-jの単位は10<sup>3</sup>DWT。

表 2.1-4 タンカー及びバルカーの2011年以降の新規船腹需要量( $TB_{ij}$ )

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

	タンカー			バルカー
	upper case	lower case		upper+ lower case
10-25	0.014	0.007	10-25	0.252
25-50	0.503	0.263	25-50	0.900
50-80	0.599	0.312	50-80	1.136
80-120	0.867	0.453	80-100	0.057
120-200	0.762	0.398	100-120	0.069
200+	2.752	1.436	120-200	0.101
合計	5.498	2.869	200+	0.980
			合計	3.494

表 2.1-1、表 2.1-2及び表 2.1-3より各船型カテゴリごとに直線近似によって作成。

### 2.1.2 総解撤喪失量の予測結果

$m$ 年における船種カテゴリごとの総解撤喪失量( $TL_{im}$ )は、次の式で定義される。

$$TL_{im} = \sum_j (1 - EX_{ijkm}) \times TC_{ijk}$$

ここで

$EX_{ijkm}$  :  $m$ 年における船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ ごとの残存率 (-)

$TC_{ijkm}$  :  $m$ 年の船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ ごとの輸送容量(DWT/年)

$TL_{ijkm}$  :  $m$ 年の船種 $i$ 、船型 $j$ 、船齢 $k$ ごとの解撤・事故により失われる輸送容量(DWT/年)

ただし、 $EX_{ijkm}$ は過去における解撤実績及び事故に関する統計資料から船型・船齢別に別途求められたものである。

$$EX_{ijkm} = 1 - \frac{TL_{ijkm}}{TC_{ijkm}}$$

造船業基盤整備事業協会(2000)が用いているタンカー及びバルカーの統計資料を参考に、2000年時点での船齢別船齢残存率( $EX_{ijk2000}$ )を求めた。これより残存率曲線を求めると図 2.1-1及び図 2.1-2となる。本来、残存率( $EX_{ijk2000}$ )は造船市場のマインドにも影響される

ため、年によっては多少の変動をすることが予想されるが、今回は2000年時点で作成された残存率( $EX_{ijk2000}$ )を将来にわたり変化しないものとし、解撤喪失量( $TL_{ijkm}$ )の計算において一律に用いることとした。

タンカーの残存率(図 2.1-1)は、 $3 \times 10^4$ DWT以上のクラスでは30年船齢における残存率は0%である。一方、 $3 \times 10^4$ DWT未満のタンカーでは40年船齢に達しても数%程度の残存が見られる。

一方、バルカーの残存率(図 2.1-2)ではタンカーに比べて大型の船型クラスにおいても40年船齢を超えて残存する率が大きく、30年船齢では10%以上の残存率を示している。

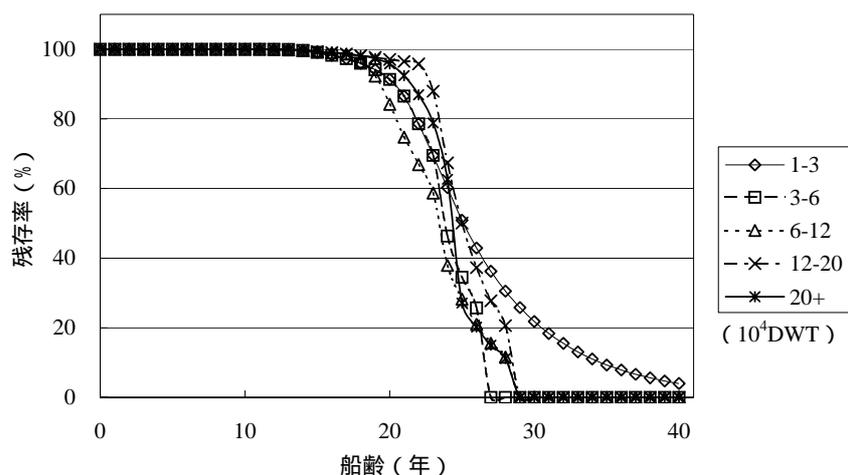


図 2.1-1 タンカーの残存率曲線

基盤協(2000)関連資料より作成。

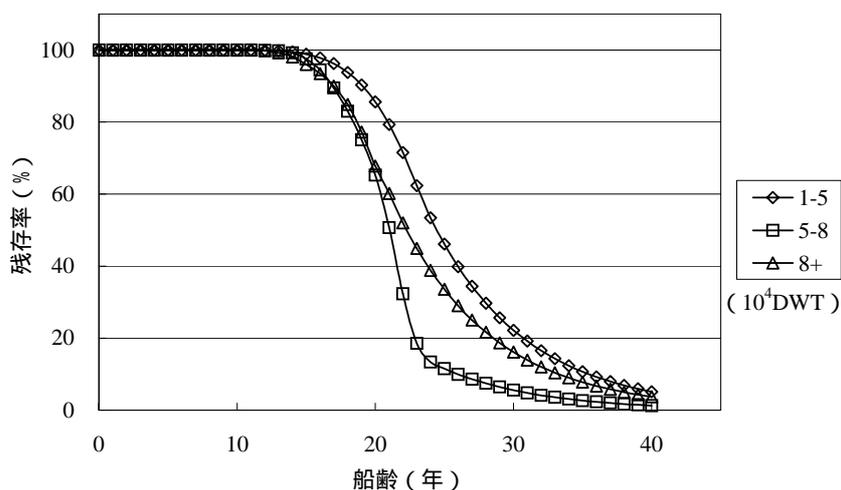


図 2.1-2 バルカーの残存率曲線

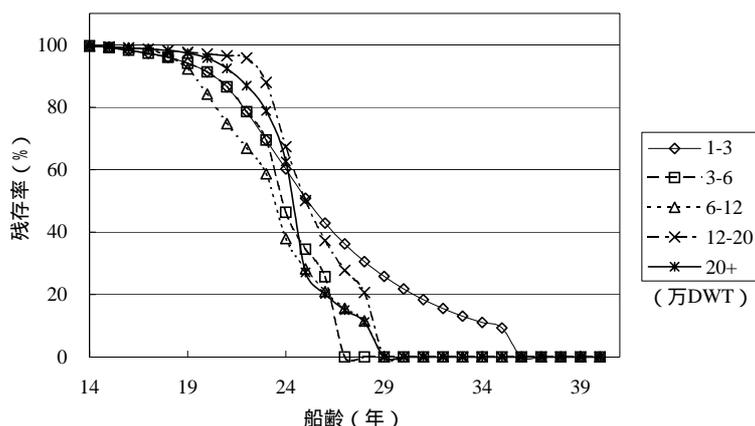
基盤協(2000)関連資料より作成。

しかし、海事産業研究所(1999)<sup>30</sup>によると、1999年において25年船齢以上のタンカーの年間の航海回数は数回程度であり、実際には高船齢船はほとんど輸送に従事しないと考えられ

<sup>30</sup> 海事産業研究所(1999)「1999年タンカー航路別船型別船齢別需要分布」

る。また、バルカーは専用船化の需要が高まる一方で一般貨物船の需要は低下しており、定性的には古い一般貨物船が専用船にリプレースされる傾向にある。

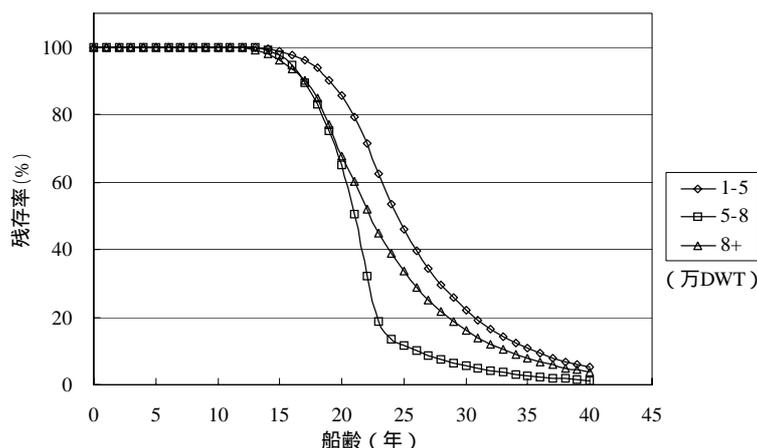
また、MARPOL73/78条約の現存船に対する規則(13G)が改正されたため、2万DWT以上の高船齢のシングルハルトンカーは、原則として船齢25年から解撤が始まり2015年を最終使用期限とすることが決定されている。以上のことから、タンカーでは35年船齢の船型クラス1~3万DWTでは船が10%残っている(図 2.1-1)が、これらはすべて解撤され新造船としてリプレースされることとして予測を行うこととした(図 2.1-3)。



36年船齢以上の船は全て解撤される。調査の内容4章の将来予測では、 $m=2000 \sim 2020$ 年について本図に示した残存率曲線が使用される。14年船齢以前の残存率( $EX_{ijkm}$ )は1.0である。

図 2.1-3 計算上用いるタンカーの残存率( $EX_{ijkm}$ )

またバルカーについては、40年船齢の船型クラス1~5万DWT、5~8万DWT、8万DWT以上で、それぞれ8%、2%、5%が残っているが、これらはすべて解撤され新造船としてリプレースされることとした(図 2.1-4)。



41年船齢以上の船は全て解撤される。

図 2.1-4 バルカーの残存率( $EX_{ijkm}$ )

これらの残存率( $EX_{ijk2000}$ )を用いて、タンカー及びバルカーの $m$ 年における総解撤喪失量( $TL_{im}$ )は次の式で計算できる。

$$TL_{im} = \sum_j \sum_k (1 - EX_{ijk2000}) \times TC_{ijkm}$$

m年における船型別の総解撤喪失量( $TL_{ijm}$ )は、船種*i*、船型*j*ごとの新規船腹需要量( $TB_{ijm}$ )の比を用い、次の式で割り振った。

$$TL_{ijm} = TL_{im} \times \frac{TB_{ijm}}{\sum_{ij} TB_{ijm}}$$

以上の過程から作成したタンカー及びバルカーの総解撤喪失量( $TL_{ijm}$ )の予測結果を表 2.1-5及び表 2.1-6に示した。

表 2.1-5 タンカーの総解撤喪失量( $TL_{im}$ )の予測

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
10-25	0.428	0.415	0.400	0.382	0.362	0.341	0.319	0.296	0.276	0.255	0.236
25-50	1.965	1.890	1.936	1.649	1.518	1.413	1.061	1.064	1.068	1.069	1.069
50-80	1.046	1.100	1.140	1.208	1.230	1.201	1.168	1.125	1.010	0.922	0.849
80-120	2.305	2.268	2.225	2.003	1.978	1.899	1.830	1.799	1.660	1.711	1.780
120-200	2.538	2.628	2.513	2.071	1.758	1.491	1.259	1.077	0.536	0.518	0.506
200+	9.517	9.319	8.473	7.448	3.949	3.313	2.844	2.503	1.400	1.532	1.702
合計	17.801	17.621	16.688	14.762	10.794	9.657	8.482	7.864	5.950	6.007	6.142

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
10-25	0.217	0.198	0.155	0.141	0.131	0.123	0.118	0.099	0.097	0.095
25-50	1.068	1.063	1.048	1.050	1.061	1.063	1.095	1.172	1.223	1.282
50-80	0.792	0.739	0.595	0.548	0.502	0.466	0.485	0.479	0.636	0.790
80-120	1.838	1.896	2.040	2.102	2.137	2.161	2.214	2.320	2.423	2.485
120-200	0.502	0.645	1.022	1.368	1.627	1.820	1.915	2.190	2.077	1.993
200+	1.976	2.371	3.166	4.870	5.191	5.409	5.542	5.964	5.702	5.757
合計	6.391	6.911	8.026	10.080	10.649	11.042	11.369	12.224	12.158	12.403

基盤協(2000)の計算で用いられた残存率を、35年船齢ですべての船が解撤されるとして修正して計算した(図 2.1-3)。2014年までは必要船腹量( $TB_j$ )の過多に影響されない。

表 2.1-6 バルカーの総解撤喪失量( $TL_{im}$ )の予測

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年
10-25	1.132	1.115	1.089	1.059	1.027	0.988	0.944	0.891	0.837	0.788	0.739
25-50	2.372	2.467	2.584	2.712	2.838	2.972	3.111	3.239	3.326	3.348	3.303
50-80	2.324	2.479	2.561	2.557	2.499	2.376	2.200	2.061	2.019	2.033	2.073
80-100	0.215	0.199	0.181	0.168	0.156	0.137	0.113	0.096	0.092	0.094	0.100
100-120	0.261	0.247	0.230	0.209	0.185	0.165	0.145	0.127	0.111	0.097	0.085
120-200	1.269	1.364	1.462	1.566	1.677	1.774	1.877	1.985	2.107	2.250	2.386
200+	0.166	0.197	0.231	0.273	0.320	0.360	0.401	0.437	0.471	0.499	0.519
合計	7.739	8.067	8.339	8.544	8.701	8.774	8.789	8.837	8.962	9.108	9.206

単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
10-25	0.217	0.198	0.155	0.141	0.131	0.123	0.118	0.099	0.097	0.095
25-50	1.068	1.063	1.048	1.050	1.061	1.063	1.095	1.172	1.223	1.282
50-80	0.792	0.739	0.595	0.548	0.502	0.466	0.485	0.479	0.636	0.790
80-100	1.437	1.460	1.524	1.525	1.496	1.468	1.445	1.379	1.351	1.321
100-120	0.401	0.436	0.516	0.577	0.641	0.693	0.769	0.941	1.072	1.164
120-200	0.502	0.645	1.022	1.368	1.627	1.820	1.915	2.190	2.077	1.993
200+	1.976	2.371	3.166	4.870	5.191	5.409	5.542	5.964	5.702	5.757
合計	6.391	6.911	8.026	10.080	10.649	11.042	11.369	12.224	12.158	12.403

基盤協(2000)の計算で用いられた残存率を、40年船齢ですべての船が解撤されるとして修正して計算した(図 2.1-4)。2014年までは必要船腹量( $TB_j$ )の過多に影響されない。

### 2.1.3 輸送容量の予測結果のまとめ

以上の総船腹需要量( $TB_m$ )及びの総解撤喪失量( $TL_{im}$ )の予測結果から輸送容量( $TC_{ijk}$ )が算定できる。

先に述べたように、 $m+1$ 年の輸送容量( $TC_{m+1}$ )は下式のように新規船腹需要量( $TB_m$ )と $m$ 年の輸送容量( $TC_m$ )の和として以下のように整理されるが、船型 $j$ あるいは船齢 $k$ の分布系で見た場合は船型 $j$ 及び船齢 $k$ に属する解撤喪失量( $TL_{im}$ )の関係式になっている点に留意されたい。

これは、前項で述べたように、船型 $j$ 及び船齢 $k$ に属する解撤喪失量( $TL_{im}$ )がリプレース後に船型の振り直しが行われるためである。

タンカーの輸送容量( $TC_{jm}$ )をupper caseを

表 2.1-7にlower caseを表 2.1-8に、バルカーの輸送容量( $TC_{jm}$ )を表 2.1-9にそれぞれ示した。

輸送容量( $TC_{ijk}$ )を総量で見た場合

$$\begin{aligned} TC_{m+1} &= TC_m - TL_m + TD_m \\ &= TC_m - TL_m + (TB_m + TL_m) \\ &= TC_m + TB_m \end{aligned}$$

輸送容量( $TC_{ijk}$ )を船型 $j$ あるいは船齢 $k$ で見た場合

$$\begin{aligned} TC_{jkm+1} &= TC_{jkm} - TL_{jkm} + TD_{jkm} \\ &= TC_{jkm} - TL_{jkm} + (TB_{jkm} + TL'_{jkm}) \end{aligned}$$

表 2.1-7 タンカーの総輸送容量( $TC_{jm}$ )の予測結果 (upper case)単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
10-25	6.73	6.36	5.99	5.62	5.23	4.85	4.47	4.13	3.80	3.50	3.22	2.96
25-50	32.51	32.72	33.84	33.89	33.51	32.59	31.64	31.22	31.09	31.09	31.31	31.72
50-60	6.68	6.29	7.50	8.35	8.93	9.14	9.33	9.65	10.06	10.48	10.85	11.33
60-80	13.36	12.58	13.61	14.19	14.42	14.13	13.89	13.90	14.10	14.29	14.26	14.28
80-120	49.95	50.47	52.9	54.07	54.41	53.43	52.67	53.01	53.94	54.86	55.18	55.59
120-200	42.37	42.67	43.39	44.16	45.76	47.92	49.12	49.78	49.87	49.64	49.95	50.73
200+	126.89	128.33	129.65	129.96	132.02	135.20	136.60	138.02	140.96	142.60	144.55	149.09
合計	278.50	279.42	286.89	290.24	294.29	297.26	297.73	299.71	303.83	306.46	309.32	315.70

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
10-25	2.73	2.52	2.32	2.13	1.97	1.85	1.75	1.67	1.59	1.51	1.46	1.41
25-50	32.28	32.81	32.83	32.89	33.07	33.45	33.88	34.33	34.81	35.34	35.78	36.20
50-60	11.95	12.58	12.94	13.34	13.82	14.46	15.14	15.86	16.60	17.38	18.14	18.82
60-80	14.52	14.91	15.00	15.16	15.41	15.88	16.40	16.99	17.61	18.28	18.97	19.59
80-120	56.53	57.69	57.78	57.9	58.14	58.55	59.01	59.47	59.97	60.56	61.02	61.42
120-200	51.98	53.10	54.24	55.46	56.69	57.83	58.70	59.37	59.89	60.43	60.69	61.10
200+	156.29	162.58	166.83	171.06	175.46	180.09	183.30	186.39	189.42	192.75	195.63	198.88
合計	326.28	336.18	341.93	347.95	354.56	362.11	368.18	374.07	379.89	386.25	391.68	397.42

船型カテゴリーjの単位は10<sup>3</sup>DWT。表中の総輸送容量( $TC$ )の予測値の単位は10<sup>6</sup>DWT。  
 総輸送容量( $TC_{m+1}$ )は、前年の総輸送容量( $TC_m$ )に総必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。

表 2.1-8 タンカーの総輸送容量( $TC_{jm}$ )の予測結果 (lower case)単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
10-25	6.73	6.36	5.99	5.62	5.23	4.85	4.19	3.44	2.81	2.36	2.05	1.83
25-50	32.51	32.72	33.84	33.89	33.41	32.61	31.37	30.30	29.53	29.01	28.82	28.61
50-60	6.68	6.29	7.50	8.35	8.87	9.14	9.40	9.46	9.42	9.38	9.50	9.60
60-80	13.36	12.58	13.61	14.19	14.36	14.13	13.86	13.46	13.00	12.53	12.16	11.82
80-120	49.95	50.47	52.9	54.07	54.25	53.41	52.39	51.58	50.96	50.46	50.24	49.84
120-200	42.37	42.67	43.39	44.16	45.50	48.22	49.07	48.17	47.32	46.93	47.44	47.96
200+	126.89	128.33	129.65	129.96	131.30	135.94	136.51	134.80	134.84	135.31	137.49	140.26
合計	278.50	279.42	286.89	290.24	292.93	298.30	296.79	291.22	287.87	285.96	287.70	289.93

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
10-25	1.70	1.57	1.44	1.33	1.24	1.21	1.19	1.16	1.14	1.10	1.04	0.98
25-50	28.37	28.17	27.92	27.73	28.07	28.47	28.86	29.22	29.55	29.73	29.73	29.75
50-60	9.85	10.13	10.38	10.67	11.28	11.93	12.58	13.25	13.91	14.49	15.12	15.68
60-80	11.81	11.88	11.92	12.01	12.42	12.92	13.44	13.98	14.54	15.01	15.62	16.15
80-120	49.61	49.53	49.23	48.94	49.50	49.53	49.59	49.68	49.77	49.65	49.72	49.72
120-200	48.45	48.91	49.71	50.59	52.11	51.87	51.62	51.36	51.09	50.69	50.96	51.28
200+	143.16	145.85	148.62	151.41	156.71	158.22	159.70	161.17	162.65	163.54	165.30	167.20
合計	292.94	296.03	299.22	302.67	311.33	314.16	316.98	319.81	322.65	324.23	327.49	330.76

船型カテゴリーjの単位は10<sup>3</sup>DWT。表中の総輸送容量( $TC$ )の予測値の単位は10<sup>6</sup>DWT。  
 総輸送容量( $TC_{m+1}$ )は、前年の総輸送容量( $TC_m$ )に総必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。

表 2.1-9 バルカーの総輸送容量( $TC_{jm}$ )の予測結果単位:10<sup>6</sup>DWT/年

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
10-25	22.19	21.19	21.03	20.71	20.28	19.66	19.34	19.41	19.44	19.48	19.72	20.13
25-50	86.56	83.70	84.98	85.62	85.76	85.07	85.21	86.55	87.47	88.17	89.30	90.70
50-60	61.71	60.63	63.76	66.41	68.78	70.16	71.21	72.39	72.67	72.08	72.80	75.63
60-80	3.52	3.40	3.41	3.42	3.45	3.43	3.36	3.36	3.35	3.31	3.31	3.46
80-100	3.22	3.04	3.03	3.04	3.08	3.05	2.96	2.95	2.95	2.91	2.90	3.07
100-120	64.58	63.80	63.11	62.34	61.51	60.45	59.20	57.92	56.51	54.92	53.24	51.69
120-200	9.55	8.90	12.68	16.58	20.68	23.51	25.35	27.89	30.23	31.63	33.22	37.05
200+	1.18	1.30	1.30	1.30	1.29	1.28	1.27	1.25	1.23	1.20	1.16	1.12
合計	252.51	245.97	253.30	259.41	264.83	266.62	267.91	271.72	273.84	273.69	275.65	282.85

船型j(10 <sup>3</sup> DWT)	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
10-25	20.34	20.39	20.57	20.81	21.12	21.49	21.93	22.44	22.98	23.54	24.10	24.65
25-50	91.12	90.75	90.75	90.87	91.21	91.77	92.52	93.45	94.45	95.42	96.26	97.04
50-60	78.51	80.88	82.96	85.01	86.99	88.92	90.78	92.49	93.90	95.06	96.11	97.15
60-80	3.65	3.78	3.89	3.99	4.09	4.18	4.28	4.38	4.47	4.55	4.63	4.71
80-100	3.30	3.49	3.65	3.83	4.02	4.23	4.44	4.66	4.90	5.13	5.35	5.56
100-120	50.08	48.24	46.22	44.06	41.76	39.29	36.69	34.02	31.31	28.66	26.18	24.00
120-200	41.50	44.99	48.12	51.26	54.45	57.74	61.14	64.68	68.32	71.93	75.33	78.44
200+	1.07	1.02	0.97	0.91	0.86	0.79	0.72	0.65	0.58	0.51	0.44	0.38
合計	289.59	293.54	297.13	300.75	304.49	308.41	312.50	316.77	320.91	324.79	328.41	331.94

船型カテゴリーjの単位は10<sup>3</sup>DWT。表中の総輸送容量( $TC$ )の予測値の単位は10<sup>6</sup>DWT。  
 総輸送容量( $TC_{m+1}$ )は、前年の総輸送容量( $TC_m$ )に総必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。

## 2.2 コンテナの輸送容量の予測

コンテナ船の建造需要量はタンカー及びバルカーと同様に次の式で求めた。輸送量の単位系がトンからTEUになっていることに留意されたい。なお、最近ではコンテナ船の大型化が著しいため、総解撤喪失量を新規建造需要量(TEU/年)として各船型に割振る際に考慮させることとした。

$$\begin{aligned} TC_{m+1} &= TC_m - TL_m + TD_m \\ &= TC_m - TL_m + (TB_m + TL_m) \\ &= TC_m + TB_m \end{aligned}$$

$TC_{m+1}$  :  $m+1$ 年初頭における総輸送容量(TEU/年)

$TD_m$  :  $m$ 年における総建造需要量(TEU/年)

$TL_m$  : 総解撤喪失量。 $m$ 年において解撤及び事故により失われリプレースされる輸送容量( $TC$ )の総計(TEU/年)

$m$  : 西暦年

$TB_m$  : 新規船腹需要量、輸送量の増加に応じて新たに必要となる輸送容量( $TC$ )の総計(TEU/年)

### 2.2.1 新規船腹需要量の予測結果

新規船腹需要量( $TB$ )の年増加率は(1)で予測した総貨物量( $TN$ )の年増加率に比例すると仮定し、1997年の総船腹量(TEU) =  $3,973 \times 10^3$ のlower caseでは2.8%分である  $111 \times 10^3$  TEU/年を、upper caseでは6.0%分である  $238 \times 10^3$  TEU/年を、2000年以降の新規船腹需要量( $TB$ )とした。

基盤協(2000)においては、タンカー及びバルカーと異なり、コンテナ船は船型ごとの新規船腹需要量( $TB$ )の予測を行っていない。

今回は、近年の大型化を反映させるため船型毎に最近5年の建造実績量( $TD_{jm}$ )の平均値( $\dot{TD}_j$ )を次式で求め、この比で新規船腹需要量を割り振ることとした。 $\dot{TD}_j$ と船型ごとの比率を表 2.2-1に示した。

$$\dot{TD}_j = \frac{\sum_{m=1996}^{2000} TD_{jm}}{5}$$

$m$  : 1996 ~ 2000年の5年

$TD_j$  : 5年間の船型 $j$ 、 $TD_{jm}$ の年平均値(TEU/年)

$TD_{jm}$  :  $m$ 年における船型 $j$ 、建造実績(TEU/年)

表 2.2-1 コンテナ船の2000年から過去5年の総建造需要量平均値( $TD_j$ )

船型区分 $j$ (TEU)	100-499	500-999	1,000-1,999	2,000-2,999	3,000-3,999	4,000+	合計
建造実績の平均値 $TD_j$ (TEU)	6,272	27,535	83,882	71,617	94,709	101,968	385,983
船型別需要量の比率	0.02	0.07	0.22	0.19	0.25	0.26	1.00

Clarkson Shipping Review & Outlook Autumn 2000より作成。

## 2.2.2 総解撤喪失量の予測結果

船型・船齢別の残存率( $EX_{jk}$ )は、タンカー・バルカーで定義した同様の次式で表される。

$$EX_{jk} = 1 - \frac{TL_{jk}}{TC_{jk}}$$

$EX_{jk}$  : 船型 $j$ 、船齢 $k$ ごとの残存率(-)

$TC_{jk}$  : 船型 $j$ 、船齢 $k$ ごとの輸送容量(TEU/年)

$TL_{jk}$  : 船型 $j$ 、船齢 $k$ ごとの解撤・事故により失われる輸送容量( $TL_{jk}$ :TEU/年)

コンテナ船の総解撤喪失量( $TL$ )の予測に関する資料は今回の調査では入手できなかった。これは、コンテナ船が海上輸送に登場して30年前後のため、タンカー、バルカーのように船型・船齢別の残存率( $EX_{jk}$ )を算出できる程度の解撤が行われていないためである。

このため、コンテナ船の残存率曲線はタンカー及びバルカーの残存率曲線をベースとして作成した。なお、作成にあたっては専門家等の聞き取りを参考にし35年船齢で残存率が0%になるよう調整した。

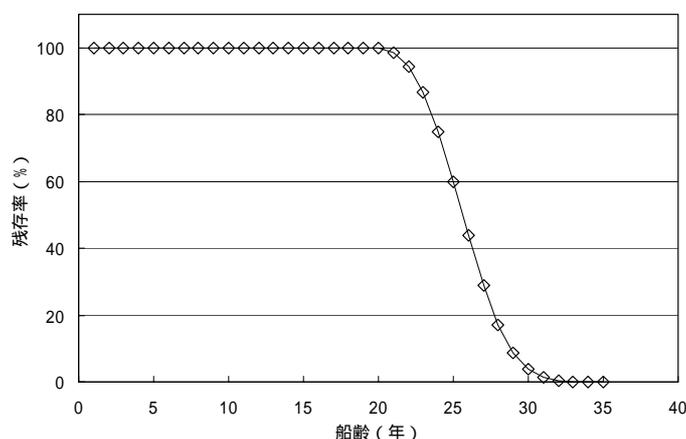


図 2.2-1 コンテナの残存率曲線( $Ex_{jk2000}$ )

造船業基盤整備事業協会資料等を参考に作成。

タンカーやバルカーと同じく、本来なら輸送に従事しない高船齢のコンテナ船がリブレースされ輸送に従事することは、総輸送容量( $TC$ )が過大評価することになる。しかし、コンテナ船では現実に35年船齢を超える船が無く、将来にわたっても小型コンテナに極めて少数出現するに過ぎないため、年間燃料消費量( $P$ )の予測計算上はほとんど影響が無いと考

えた。

最近ではコンテナ船の大型化が著しいため、コンテナ船の残存率曲線を船型カテゴリー別に複数用意することも考えたが、船型別に残存率曲線を推定するには十分な情報が得られなかったため、本調査ではコンテナ船のすべての船型で同じ残存率曲線を用いることとした。

残存率( $EX_{ijkm}$ )を用いて次の式で計算したコンテナ船の総解撤喪失量( $TL$ )を表 2.2-2に示した。

$$TL_{im} = \sum_j \sum_k (1 - EX_{jk2000}) \times TC_{jkm}$$

リプレース後の総解撤喪失量( $TL$ )は、船種 $i$ 、船型 $j$ ごとの必要船腹量( $TB_{ij}$ )の比、つまり最近5年の総建造需要量( $TD_{jm}$ )の平均値( $TD_j$ )を用いて、次の式で割り振った。

$$TL_j = TL \times \frac{TD_j}{\sum_j TD_j}$$

表 2.2-2 コンテナ船の解撤喪失量

単位:10<sup>3</sup>TEU/年

年	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
総解撤喪失量	98	103	106	109	111	113	115	117	120	124
年	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
総解撤喪失量	128	135	142	150	162	175	191	209	225	238

図 2.2-1に示した残存率曲線を用いて算出した。

### 2.2.3 総輸送容量の予測結果のまとめ

以上の手順を経て作成したコンテナ船の船腹量の予測結果をlower caseについて表 2.2-3 にupper caseについて表 2.2-4に示した。なお、1997年と2020年の船型*j*ごとの輸送容量( $TC_j$ )の比率を表 2.2-3および表 2.2-4の下段に、それぞれ示した。

表 2.2-3 コンテナ船の船型別輸送容量( $TC_{jm}$ )の予測結果(lower case)

単位:10<sup>3</sup>TEU

年	船型カテゴリー <i>j</i> (TEU)						合計
	1000未満	1000～1999	2000～2999	3000～3999	4000～4499	4500以上	
1997	704	1,036	780	547	327	306	3,699
1998	725	1,100	865	600	361	321	3,973
1999	718	1,135	916	676	420	347	4,211
2000	687	1,113	920	690	433	353	4,195
2001	665	1,117	948	737	470	369	4,307
2002	643	1,122	975	783	508	386	4,418
2003	622	1,126	1,002	829	548	403	4,529
2004	601	1,131	1,027	873	587	421	4,640
2005	583	1,137	1,050	915	628	439	4,751
2006	568	1,145	1,072	955	668	456	4,863
2007	555	1,154	1,092	993	707	472	4,974
2008	544	1,165	1,112	1,031	745	487	5,085
2009	537	1,178	1,131	1,069	782	501	5,196
2010	531	1,192	1,149	1,106	818	512	5,308
2011	527	1,208	1,167	1,145	851	521	5,419
2012	525	1,225	1,186	1,184	883	527	5,530
2013	524	1,245	1,206	1,224	914	529	5,641
2014	525	1,266	1,227	1,265	943	528	5,753
2015	526	1,289	1,248	1,306	971	524	5,864
2016	528	1,313	1,269	1,348	999	517	5,975
2017	532	1,338	1,287	1,390	1,028	511	6,086
2018	537	1,363	1,302	1,433	1,057	506	6,198
2019	544	1,387	1,311	1,475	1,087	505	6,309
2020	553	1,410	1,314	1,517	1,118	508	6,420
1997/2020比 (%)	79%	136%	168%	277%	342%	166%	174%

船型カテゴリー*j*の単位はTEU。表中の総輸送容量( $T$ )の予測値の単位は10<sup>3</sup>TEU。  
 総輸送容量( $TC_{m+j}$ )は、前年の総輸送容量( $TC_m$ )に総必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。

表 2.2-4 コンテナ船の船型別輸送容量( $TC_{jm}$ )の予測結果(upper case)

単位:10<sup>3</sup>TEU

年	船型カテゴリ-j (TEU)						合計
	1000未満	1000 ~ 1999	2000 ~ 2999	3000 ~ 3999	4000 ~ 4499	4500以上	
1997	704	1,036	780	547	327	306	3,699
1998	725	1,100	865	600	361	321	3,973
1999	718	1,135	916	676	420	347	4,211
2000	709	1,168	967	753	479	373	4,450
2001	699	1,200	1,019	831	540	400	4,688
2002	688	1,232	1,070	908	602	427	4,926
2003	677	1,264	1,120	985	664	455	5,165
2004	668	1,297	1,168	1,060	727	483	5,403
2005	661	1,331	1,215	1,133	791	510	5,641
2006	657	1,366	1,261	1,204	854	538	5,880
2007	655	1,403	1,305	1,274	917	565	6,118
2008	656	1,441	1,348	1,343	978	590	6,356
2009	659	1,482	1,390	1,412	1,039	614	6,595
2010	664	1,523	1,432	1,481	1,097	635	6,833
2011	672	1,567	1,474	1,550	1,154	654	7,072
2012	681	1,612	1,517	1,621	1,209	671	7,310
2013	691	1,659	1,560	1,692	1,263	683	7,548
2014	703	1,708	1,604	1,764	1,316	692	7,787
2015	715	1,759	1,649	1,836	1,368	698	8,025
2016	729	1,811	1,693	1,910	1,419	702	8,263
2017	744	1,863	1,735	1,983	1,470	706	8,502
2018	760	1,915	1,773	2,057	1,523	712	8,740
2019	778	1,967	1,806	2,130	1,576	721	8,979
2020	798	2,018	1,833	2,203	1,631	734	9,217
2020/1997比 (%)	113%	195%	235%	403%	499%	240%	249%

船型カテゴリ-jの単位はTEU。表中の総輸送容量( $T$ )の予測値の単位は10<sup>3</sup>TEU。  
 総輸送容量( $TC_{m+j}$ )は、前年の総輸送容量( $TC_m$ )に総必要船腹量( $TB_m$ )を加えたものである。

### 3 対策を施した場合のCO<sub>2</sub>排出量の将来予測

ここでは 調査の内容の7.2.2に示したCO<sub>2</sub>排出量削減方策のうち表3.0-1に示す対策についてCO<sub>2</sub>排出量の削減(=燃料消費量の削減)の効果を定量的に把握するための試算を試みた。

対策1では、老齢船の早期代替の効果を予測することとした。また、船単体の燃料消費率の削減技術(対策2及び4)の効果について予測した。なお、船単体の燃料消費率の削減技術は、5.2で整理したように2002年から広範に導入可能な短期的技術と、2008年以降導入可能な中期的技術に分けてその効果を予測した。また、減速航行の効果を対策3として予測した。

予測においては、対策3を含めて燃料価格、積荷率は現状のままとし、運航量など船舶運航全体への影響は無視できるものと仮定して、純粋に温室効果ガス削減技術の効果について評価した。

表3.0-1 輸送エネルギー効率改善対策内容総括表

ゼロオプション	何も対策を採らない( 調査の内容の第4章で行った将来予測に相当)
対策1	老齢船の代替を促進し、輸送エネルギー効率の改善を図る
対策2	短期的に導入可能な燃料消費率( $C_{ijk}$ )の削減技術を全船舶を対象に見込む
対策3	減速航行を導入
対策4	長期的に導入が想定される燃料消費率( $C_{ijk}$ )の削減技術を新造船に対して見込む

#### 3.1 対策1；老齢船の早期代替を促進し、輸送エネルギー効率の改善を図る場合

船の代替を促進することにより燃料消費率( $C_{ijk}$ )の悪い老齢船が淘汰され、輸送エネルギー効率の改善ならびにCO<sub>2</sub>排出量の削減が期待できる。この場合、LCA 的観点から見れば、船の解撤・代替船の建造に伴い消費される燃料消費が懸念されるが、5.1.1で紹介したように、船舶の運航に伴い消費する燃料に起因するCO<sub>2</sub> 排出量に比べて、建造・解撤に起因するCO<sub>2</sub> 排出量はわずかであるとの研究事例もある。よって、船の解撤・造船に伴い消費される燃料に比べ、船の早期代替による総燃料消費量( $P$ )の削減の効果の方が大きいと考えられ、LCA的観点からも船の早期代替は好ましいと考えられる。

そこで、タンカー、バルカー、コンテナ船の全てについて、国際海事機関(IMO)の第46 回海洋環境保護委員会(MEPC46)でのMARPOL条約13G規則の合意内容と同等の規制(船齢の最大限を25年とする)がかかるという仮定で、燃料消費量の将来予測を行った。船型別の要件については表 3.1-1にまとめた。この対策では付録2章で述べた総解撤喪失量( $TL$ )の予測が、ゼロオプションの場合と異なってくる(表 3.1-2参照)。

予測結果を表 3.1-3及び表 3.1-4に示した。

タンカーは、13G規則の効果をゼロオプションにおいても見込んでいるため変化がない。

バルカー及びコンテナ船では、 調査の内容の4.2節で述べたように、タンカーのような高船齢船への分布に偏りが元々ないため、老齢船の早期代替を促進しても、短期的にも、長期的にも、燃料消費量は単調増加するものと予想され、1997年の燃料消費量に比べて、2010年ではバルカーが21%、2020年には同じく33%の増加となり、コンテナでは、lower case及びupper caseの

それぞれで、2010年では30%及び75%、2020年で62%及び134%の増加になると予測された。

この結果、外航船舶全体の燃料消費量は、25年船齢での老齢船の早期代替を行った場合でも、2010年で19~42%、2020年では38~74%(いずれも対1997年比)の増加となるものと予測された。ゼロオプションと比較した場合、2010年及び2020年の削減効果はいずれも1%に留まると推定された。早期代替は、導入初期において効果があるが、導入後10年程度でその効果が小さくなる。

表 3.1-1 MARPOL条約13G 規則の概要

カテゴリー	DWT	建造年代	フェーズアウト 開始時期	最終使用 期限
1	2 万	1982 より前	2003 年	2007 年
2	2 万	1982~1996	2003 年	2015 年
3	5 千~2 万	(建造年代による制限なし)	2003 年	2007 年

カテゴリー2 については、最大25 歳船齢まで使用可能。

最終使用期限を越える船については、CAS(コンディション・アセスメント・スキーム)が課される。

表 3.1-2 総解撤喪失量(TL)の算出方法へのMARPOL条約13G規則の組込の考え方

カテゴリー (表 3.1-1と同じ)	モデル計算上の解撤条件
1	1982年より前に建造された船について、2003~2007 年までにすべての船が解撤されることとし、各年の解撤量(DWT)は同じとする。
2	1982~1996年に建造された船について、2003~2015 年までにすべての船が解撤されることとし、各年の解撤量(DWT)は同じとする。
3	2003~2007 年までにすべての船が解撤されることとし、各年の解撤量(DWT)は同じとする。

表 3.1-3 対策1(lower case):老齢船の代替を促進する場合の燃料消費量の将来予測

(10<sup>6</sup> t-Fuel/年)

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	33	34	36	37	39
1997比	0.0%	-6.6%	-4.5%	2.3%	4.2%	11.1%
バルカー	37	38	41	45	47	49
1997比	0.0%	1.9%	11.0%	20.7%	28.3%	33.3%
コンテナ船	45	49	53	59	66	73
1997比	0.0%	8.2%	17.8%	30.0%	46.6%	62.2%
不明分	7	7	8	9	9	10
1997比	0.0%	1.8%	9.0%	18.7%	28.1%	37.7%
合計	124	127	136	148	159	171
1997比	0.0%	1.8%	9.0%	18.7%	28.1%	37.7%

将来の輸送容量(C)、輸送総量(TR)は、調査の内容4.1で作成した値を用いた。船の代替船齢を25年船齢とした。なお、代替は付録2に示した残存率曲線に従って徐々に行われることとした。

表 3.1-4 対策1(upper case):老齡船の代替を促進する場合の燃料消費量の将来予測  
(10<sup>6</sup> t-Fuel/年)

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	35	37	43	45	49
1997比	0.0%	-1.2%	5.5%	22.3%	27.3%	38.8%
バルカー	37	38	41	45	47	49
1997比	0.0%	1.9%	11.0%	20.7%	28.3%	33.3%
コンテナ船	45	59	66	79	93	105
1997比	0.0%	30.7%	47.7%	75.2%	105.5%	133.7%
不明分	7	8	9	10	11	12
1997比	0.0%	12.0%	23.4%	42.1%	57.7%	73.5%
合計	124	139	153	177	196	216
1997比	0.0%	12.0%	23.4%	42.1%	57.7%	73.5%

将来の輸送容量(C)、輸送総量(TR)は、調査の内容4.1で作成した値を用いた。船の代替船齢を25年船齢とした。なお、代替は付録2に示した残存率曲線に従って徐々に行われることとした。

### 3.2 対策2；短期的に導入可能な燃料消費率の削減技術を見込んだ場合

調査の内容 7.2.2(1) で記載した推進器に対する各種改善技術については、技術としては既に完成されたものであり、適用範囲も広い。特にPBCFは適用可能な船型も比較的広範でレトロフィットも可能であり、その効果は5%程度と見込まれる。

そこで、ここでは燃料消費率の削減割合(RC)を船種・船型・船齢に関わらず一律に5%と仮定し、新造船及び既存船の全てに適用した場合の効果を評価することとした。ここでは既存船の適用については、適用される技術がすべての船に行き渡るのに2002年から10年(平均ドック入り間隔の2倍)かかると仮定し、燃料消費量の将来予測を行った。表 3.2-1及び表 3.2-2に計算結果を示した。

表 3.2-1 対策2(lower case): 短期的に導入可能な燃料消費率削減技術を折り込んだ場合の燃料消費量の将来予測

(10<sup>6</sup> t-Fuel/年)

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	33	33	34	35	37
1997比	0.0%	-7.4%	-6.7%	-2.4%	-1.0%	5.5%
バルカー	37	38	41	44	46	47
1997比	0.0%	2.7%	10.2%	15.5%	22.2%	26.5%
コンテナ船	45	50	54	57	63	70
1997比	0.0%	12.1%	19.1%	27.1%	40.5%	55.6%
不明分	7	8	8	8	9	10
1997比	0.0%	3.3%	8.6%	14.6%	22.3%	31.4%
合計	124	128	135	143	152	163
1997比	0.0%	3.3%	8.6%	14.6%	22.3%	31.4%

将来の輸送容量(C)、トンマイルベースの輸送総量(TR)は、調査の内容4.1で作成した値を用いた。短期的技術の削減割合(RC)は5%とした。

表 3.2-2 対策2(upper case): 短期的に導入可能な燃料消費率削減技術を折り込んだ場合の燃料消費量の将来予測

(10<sup>6</sup> t-Fuel/年)

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	35	37	42	43	46
1997比	0.0%	-1.7%	4.1%	19.3%	22.6%	31.9%
バルカー	37	38	41	44	46	47
1997比	0.0%	3.1%	11.4%	17.9%	23.8%	26.5%
コンテナ船	45	61	67	78	89	100
1997比	0.0%	34.6%	49.4%	73.2%	97.7%	122.1%
不明分	7	9	8	11	11	13
1997比	0.0%	18.3%	6.4%	47.4%	48.6%	75.0%
合計	124	142	153	174	189	206
1997比	0.0%	14.0%	22.8%	40.0%	51.7%	65.4%

将来の輸送容量(C)、トンマイルベースの輸送総量(TR)は、調査の内容4.1で作成した値を用いた。短期的技術の削減割合(RC)は5%とした。

表 3.2-1及び表 3.2-2によれば、タンカーの場合lower caseの場合には新技術導入の効果によって2020年における燃料消費量の増加は1997年に比べて6%程度に抑えることができると予想された。しかし、バルカー及びコンテナにおいては、新技術導入を図っても燃料消費量は単調増加するものと予想され、2020年においてバルカーで27%、コンテナでlower caseで56%増、upper caseで122%増(1997年比)となると予測された。

以上の結果、外航船舶全体の燃料消費量は、ゼロオプションに比較すれば、2020年においてupper caseで-8.7%、lower caseで-6.9%(1997年比)と予測される。

### 3.3 対策3；減速航行を導入する場合

船単体の燃料消費率( $C_{ijk}$ )は速度の3乗に比例するため、減速航行による燃料消費率( $C$ )の削減割合( $RC$ )は大きく、減速によって年間航行日数( $X$ )が増加しても燃料消費量( $P$ )は減少する。従って、実行可能性の問題とは別にここではその効果を計算することとした。減速割合は、比較的高速で航行しているコンテナ船は80%(20%減速)、タンカー、バルカーはslow steamingを行っていることが多いため、90%(10%減速)として計算した。減速航行により不足する船腹数については、各カテゴリーにおいて年間運航日数が340日を越えた時点で、同カテゴリーの隻数を増加させることで対応させた。

表 3.3-1及び表 3.3-2に対策3の予測結果を示した。これによれば、予想通り減速航行の削減効果は大きく、外航船舶全体での燃料消費量は、lower caseでは1997年比で2010年に17%減となり、2020年においてもほぼ1997年レベルにとどまると予測された。一方、upper caseでは、2010年付近で1997年レベルに戻り、2020年では25%増となってしまうと予測された。

表 3.3-1 対策3(lower case): 減速航行を実施した場合の燃料消費量の将来予測

(10<sup>6</sup> t-Fuel/年)

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	27	27	29	30	32
1997比	0.0%	-24.3%	-22.7%	-17.2%	-15.6%	-10.0%
バルカー	37	31	34	36	39	40
1997比	0.0%	-16.1%	-8.6%	-2.0%	4.2%	7.9%
コンテナ船	45	33	35	38	43	47
1997比	0.0%	-27.6%	-22.0%	-14.8%	-5.3%	4.9%
不明分	7	6	6	6	7	7
1997比	0.0%	-23.0%	-18.0%	-11.5%	-5.4%	1.3%
合計	124	96	102	110	118	126
1997比	0.0%	-23.0%	-18.0%	-11.5%	-5.4%	1.3%

将来の輸送容量(C)、トンマイルベースの輸送総量(TR)は、調査の内容4.1で作成した値を用いた。減速率(減速後/減速前の速度(knt))は、タンカー・バルカーで90%、コンテナ船で80%とした。

表 3.3-2 対策3(upper case): 減速航行を実施した場合の燃料消費量の将来予測

(10<sup>6</sup> t-Fuel/年)

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	28	30	35	36	40
1997比	0.0%	-20.0%	-14.6%	-0.9%	3.1%	12.4%
バルカー	37	31	34	36	39	40
1997比	0.0%	-16.1%	-8.6%	-2.0%	4.2%	7.9%
コンテナ船	45	39	44	51	59	67
1997比	0.0%	-13.4%	-3.2%	13.7%	31.5%	49.6%
不明分	7	6	7	7	8	9
1997比	0.0%	-16.2%	-8.3%	4.3%	14.4%	25.3%
合計	124	104	114	130	142	156
1997比	0.0%	-16.2%	-8.3%	4.3%	14.4%	25.3%

将来の輸送容量(C)、トンマイルベースの輸送総量(TR)は、調査の内容4.1で作成した値を用いた。減速率(減速後/減速前の速度(knt))は、タンカー・バルカーで90%、コンテナ船で80%とした。

#### 3.4 対策4；中期的に導入が想定される燃料消費率の削減技術を見込んだ場合

対策2で予測したように、短期的な船単体の燃料消費率( $C_{ijk}$ )の削減技術を導入した場合でも、外航船舶全体での燃料消費量( $P$ )は逆に増加する。そこで、さらに将来に実用化が期待できる中期的削減技術を導入した場合の効果を定量的に評価した。

中期的な燃料消費率削減技術の具体的な例(4.1参照)としては、メタノール、DME、LNG、水素等への燃料転換及びマイクロバブルなどによる粘性抵抗低減技術などを想定した。

これらの技術は、開発目標を削減割合( $RC$ )で最大で20%程度いることから、燃料消費率の削減割合( $RC$ )を15%と仮定して計算を行った。

これらの技術の導入には、大掛かりな改修が必要となるため、既存船への導入は難しいと考えられるので、2008年以降に建造される新造船のみに導入されることとした。計算結果を表 3.4-1及び表 3.4-2に示した。

表 3.4-1 対策4(lower case): 中期的に導入が想定される燃料消費率の削減技術を見込んだ場合の燃料消費量の将来予測

(10<sup>6</sup> t-Fuel/年)

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	33	34	35	36	37
1997比	0.0%	-6.6%	-4.5%	0.4%	1.7%	6.0%
バルカー	37	38	42	44	46	47
1997比	0.0%	3.6%	12.8%	17.9%	25.3%	27.3%
コンテナ船	45	51	55	58	64	71
1997比	0.0%	13.1%	21.9%	29.9%	43.0%	57.3%
不明分	7	8	8	9	9	10
1997比	0.0%	4.2%	11.1%	17.3%	25.0%	32.4%
合計	124	130	138	146	156	165
1997比	0.0%	4.2%	11.1%	17.3%	25.0%	32.4%

将来の輸送容量(C)、トンマイルベースの輸送総量(TR)は、調査の内容4.1で作成した値を用いた。長期的技術の削減割合(RC)は15%とした。

表 3.4-2 対策4(upper case): 中期的に導入が想定される燃料消費率の削減技術を見込んだ場合の燃料消費量の将来予測

(10<sup>6</sup> t-Fuel/年)

年(m)	1997年	2002年	2005年	2010年	2015年	2020年
タンカー	35	35	37	43	44	47
1997比	0.0%	-1.2%	5.5%	21.6%	25.8%	34.1%
バルカー	37	38	42	44	46	47
1997比	0.0%	3.6%	12.8%	17.9%	25.3%	27.3%
コンテナ船	45	61	68	79	90	102
1997比	0.0%	35.3%	51.3%	75.4%	101.0%	127.2%
不明分	7	8	9	10	11	12
1997比	0.0%	14.3%	25.4%	41.6%	55.0%	68.2%
合計	124	142	156	176	193	209
1997比	0.0%	14.3%	25.4%	41.6%	55.0%	68.2%

将来の輸送容量(C)、トンマイルベースの輸送総量(TR)は、調査の内容4.1で作成した値を用いた。長期的技術の削減割合(RC)は15%とした。

表 3.4-1及び表 3.4-2によれば、タンカーでは、lower caseにおいてはある程度の燃料消費量の削減が達成できるものと期待され、2020年において6%増の水準(1997年比)に抑えることができると予想された。しかしながら、upper caseでは34%増となるものと予想された。

バルカー及びコンテナ船では、この対策を講じた場合でも、1997年の燃料消費量に比べて、2020年ではバルカーが27%、コンテナはlower caseで57%、upper caseで127%の増加となるものと考えられた。

今回の設定では、2008年に以降の新造船にのみ中期的削減技術が導入されるとしたので、2020年においても導入開始後12年目であり、計算上は隻数ベースで全体の約37%の船舶にしか適用されていないため、その効果は大きく現われていないと言える。

#### 4 環境税の導入

地球温暖化問題が論議され始めた当初から、経済的対策の一つとして論議されていたものが炭素税やCO<sub>2</sub>税といった方策である。これらの課税は温室効果ガスの放出によって生じる影響を外部コストと考えることを根拠としており、課税によって環境負荷の大きい製品や活動のコストが上昇し、ひいては環境負荷の小さい選択肢が選定され易くなることを期待するものである。

環境税の導入は既にヨーロッパの国々で事例がある。表 3.4-1は2000年時点における状況であるが、CO<sub>2</sub>やSO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等の種々の環境汚染物質に対する課税の事例が認められる。物品税として既に燃料等に課税されている場合でも、上乘せ課税を実施する場合も認められる。例えば、オランダでは重油に対して31EUR/tonの課税を行っているが、このうち物品税に相当する部分は16EUR/tonで、一般エネルギー税(環境税の一種)に相当する部分は15EUR/tonである<sup>31</sup>。

このように、ヨーロッパでは種々の環境税が既に実施されているものの、様々な問題を抱えている事も事実である。

環境税を導入した国のほとんどがその相殺に物品税や所得税の減税を実施しているのが実態である。例えば、スウェーデン、デンマーク、オランダ、フィンランドでは個人所得税の引き下げと相殺し、ベルギー、デンマーク、オランダ、フィンランド、ドイツ、イギリス、イタリアでは社会保険や雇用保険料の削減を同時に実施している。また、スペインは環境税の導入と同時に新エネルギー開発計画の助成及び道路税を削減した。

課税の見直し等も早くもみられており、イタリアでは燃料価格が上昇すぎたとして1999年に導入したCO<sub>2</sub>税の税率を早くも削減した。また、環境税のイニシアチブを握っているイギリスでも課税が行き過ぎたとして環境税の税率削減の動きがある。その他、スウェーデンのように名目上は燃料の利用に課金をしているものの、表7.3-4のように種々の控除によって名目上の税率に対する実質の税率は1/3程度になっている場合も見受けられる<sup>1</sup>。

表 3.4-3 スウェーデン(2000年)における工業分野での燃料使用に対する課税の状況

対象	名目上の税率	実質の税率
ガソリン等の石油製品(m <sup>3</sup> )	208 EUR/unit	61 EUR/unit
LPG(ton)	146 EUR/unit	65 EUR/unit
天然ガス(1000m <sup>3</sup> )	118 EUR/unit	45 EUR/unit
石炭(ton)	143 EUR/unit	53 EUR/unit

Stephan and Ekins(2000)から引用

以上のように、単一の国においても環境税の導入は何らかの減税策と並行して実施されることが通常で、また燃料価格等の面から見直されているケースも少なくない。まして、船舶輸送のような多数の国の便益が関連する場合は、各国経済への影響も含めた、十分に慎重な論議が必要であると考えられる。

<sup>31</sup> S. Stephan and P. Ekins(2000) Recent Trends in the Application of Economic Instruments in EU Member States plus Norway and Switzerland and an Overview of Economic Instruments in Central and Eastern Europe. Update of Environmental Taxes and Charges. Report to DG Environment. Contract No.B4-3040/99/123779/MAR/B2.

表 3.4-1 EU、ノルウェー及びスイスにおける環境税の導入状況(自動車燃料及びその他のエネルギー産業について)

Xは導入していることを示す(Stephan and Ekins(2000)から引用)

	オーストリア	ベルギー	ドイツ	フランス	ドイツ	ギリシャ	アイスランド	イタリア	ルクセンブルグ	オランダ	ノルウェー	ポルトガル	スペイン	スウェーデン	スイス	イギリス
自動車燃料																
物品税	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
炭素/エネルギー税		X						X		X				X		
硫黄税		X		X										X		
NOx課金																
その他の税				X												
消費税	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
基金等/その他				X	X					X					X	
その他のエネルギー-産業																
物品税	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
炭素/エネルギー税	X	X						X		X			X <sup>b</sup>	X	X	X <sup>a</sup>
硫黄税		X		X				X					X <sup>b</sup>	X	X <sup>c</sup>	
NOx課金				X				X						X		
その他の税											X <sup>d</sup>					
消費税	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
基金等/その他				X	X					X					X	X <sup>e</sup>

a 気候変動課金(エネルギーの商業利用に対する課税)(2001年に廃止の予定)

b 規制レベルでの課金

c 軽油の硫黄分に対する課金

d 電気税(再構築する環境会計の一部として)(新しいエネルギー税が自動車燃料税やその他のエネルギー産業税の一部として導入される)

e 電気に対する間接税(化石燃料税)(化石燃料を使用しない新しいエネルギーの導入促進)

平成12年度船舶からの温室効果ガス(CO<sub>2</sub>等)の排出削減に関する調査研究  
報告書

平成13年6月発行

発行 財団法人シップ・アンド・オーシャン財団 海洋政策研究部

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-15-16

TEL.03-3502-1828 FAX.03-3502-2033

本書の無断掲載、複写、複製を禁じます。

ISBN4-88404-038-4